



Hinc patriam sustinet

**Instituto Superior de Agronomia**  
**Universidade Técnica de Lisboa**

**Sistema para a predição de biomassa aérea total  
e por componentes em povoamentos puros regulares  
de *Eucalyptus globulus* Labill.**

**Tânia Sofia Moreira de Paiva de Almeida Oliveira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais**

Orientador: Doutora Maria Margarida Branco de Brito Tavares Tomé

**Jurí:**

Presidente: Doutor Ângelo Manuel Melo de Carvalho Oliveira, Professor Catedrático do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais: Doutora Maria Margarida Branco de Brito Tavares Tomé, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor José Augusto Lopes Tomé, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutora Ana Paula Soares Marques de Carvalho, Assessora do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

Lisboa, 2008



Tese desenvolvida no âmbito dos projectos:

**CarbWoodCork** – “Simulation of the effect of different forest management strategies and climate change on wood/cork production and CO<sub>2</sub> sequestration for the most important species of Portuguese forests”, POCTI/AGR/57279/2004 e PPCDT/AGR/57279/2004

**EFORWOOD** – “Tools for sustainability impact assessment of the forestry-wood chain – EFORWOOD”, contracto nº 518128-2, 6th Framework Program

## Resumo

A crescente necessidade de informação sobre o armazenamento e sequestro de carbono na floresta tornou a estimação da biomassa florestal uma questão relevante, tanto mais importante no caso de espécies de crescimento rápido e com gestão intensiva, como é o caso da *Eucalyptus globulus* Labill.. Vários métodos têm sido testados para estimar a biomassa existente ao nível dos povoamentos, mas a utilização dos dados resultantes de inventários florestais continua a ser o mais simples e facilmente aplicável.

Nesta tese, partindo do trabalho já desenvolvido para o modelo Globulus 3.0, foram desenvolvidos dois sistemas de equações alométricas para a estimação da biomassa aérea total e das diferentes componentes de biomassa de povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. nos quais a propriedade da adição das estimativas das componentes de biomassa igualar a estimativa da biomassa aérea total está garantida. Os sistemas utilizam como regressores apenas variáveis do povoamento que normalmente resultam dos inventários florestais para que possam ser facilmente utilizados.

**Palavras-chave:** *Eucalyptus globulus* Labill.; equações de biomassa ao nível do povoamento; equações alométricas; inventário florestal

## Abstract

The growing need for information about carbon stocks and sequestration by forests has made forest biomass estimation a relevant issue, far more important in the case of fast growing and intensively managed species such as *Eucalyptus globulus* Labill.. Several methods have been used to estimate the existing biomass at stand level, but using data resulting from forest inventories is simpler and easily applicable.

This thesis, starting from the work already developed for the Globulus 3.0 model, developed two systems of allometric equations for predicting total aboveground biomass and the different biomass components for *Eucalyptus globulus* Labill. guarantying the equality of the estimate of total aboveground biomass with the sum of the estimates for the different biomass components. The systems use as regressors just stand variables that are usually a result of forest inventories so that they can be easily applicable .

**Key-words:** *Eucalyptus globulus* Labill.; stand level biomass equations; allometric equations; forest inventory



## Extended abstract

The growing need for information about carbon stocks and sequestration by forests has made forest biomass estimation a relevant issue, far more important in the case of fast growing and intensively managed species such as *Eucalyptus globulus* Labill.. The carbon stock variations can be measured directly, but it is easier to use easily obtainable variables such as the ones resulting from forest inventories to predict biomass.

Constant biomass expansions factors have been widely used, but they were found to vary with stand development, so more precise models to estimate the existing biomass at stand level using data resulting from forest inventories are needed.

In order to develop a system of equations for predicting aboveground biomass at stand level for eucalyptus plantations, it was decided to improve the work made for the Globulus 3.0 model, turning it into a more sturdy and accurate model. More sophisticated statistical techniques were used and the autocorrelation structure of the errors was considered.

From the bibliography, the most frequently used variables were selected, always having in consideration if they were easily accessible from forest inventories.

To develop the stand models, data already verified and validated in the GLOBLAND project and allometric equations with stand variables were used. The large quantity of data allowed the partition into two data sets, one for the model fitting and other for the model validation.

Two systems of equations have been selected for predicting total aboveground biomass and biomass of wood, bark, branches and leaves, one considering stand age and the other one without stand age. The stand age is sometime difficult to access, therefore the need to develop a system without this variable.

The models were developed using SAS programs and its development was divided in two stages. In the first stage a model was built using the non-linear, least squares, iterative regression procedure PROC NLIN and selecting several regressors (stand age, stand density, cultural regime and site index). In the second stage the best model chosen was improved and evaluated using the PROC MODEL procedure and in order to account for the heteroscedasticity, weighted regression using the Huber function was used. In a final stage, the chosen equations for both systems were simultaneously adjusted considering that total aboveground estimates were equal to the sum of the biomass components estimates. This property of additivity among the biomass components and the total aboveground biomass was guaranteed by the use of the non-linear seemingly unrelated estimation method applied iteratively by choosing the ITSUR option of the PROC MODEL procedure.

The models have a good predictive capacity for stand level biomass estimation using only three stand variables easily accessible in the forest inventories; stand age, stand density and cultural regime.

## Índice geral

Resumo.....	ii
Abstract.....	ii
Extended abstract.....	iii
Índice geral.....	iv
Lista de tabelas.....	vi
Lista de figuras.....	vii
Lista de abreviaturas e símbolos.....	xi
1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	3
3. Dados.....	6
3.1 Descrição.....	6
4. Metodologia.....	13
4.1 Selecção de um modelo base.....	13
4.2 Selecção de uma formulação do modelo alométrico para cada componente de biomassa.....	13
4.3 Ajustamento simultâneo dos sistemas de equações.....	16
4.4 Validação e caracterização da capacidade preditiva dos modelos.....	17
5. Resultados.....	19
5.1 Modelos seleccionados para cada componente da biomassa.....	19
5.2. Ajustamento simultâneo dos sistemas de equações.....	21
5.2.1 Sistema de equações com idade.....	22
5.2.2 Sistema de equações sem idade.....	23
5.3 Validação e caracterização da capacidade preditiva do modelo.....	25
6. Conclusão.....	26
Referências bibliográficas.....	28
ANEXOS.....	33
ANEXO 1 : Caracterização dos dados dos conjuntos de ajustamento e de validação por região climática e regime de exploração.....	A1
ANEXO 2 : Gráficos da relação entre as diferentes componentes de biomassa com a altura dominante e a área basal dos conjuntos de ajustamento e validação.....	A4

ANEXO 3 : Gráficos dos resíduos <i>studentizados</i> em papel de probabilidade normal ( <i>Normal QQ plot</i> ) das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade.....	A9
ANEXO 4 : Gráficos dos resíduos <i>studentizados</i> em função dos valores preditos das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade.....	A13
ANEXO 5 : Gráficos dos resíduos em função dos resíduos anteriores de ordem 1, 2 e 3.....	A17
ANEXO 6 : Diagnósticos de colinearidade das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade.....	A22
ANEXO 7 : Gráficos dos resíduos <i>studentizados</i> em papel de probabilidade normal ( <i>Normal QQ plot</i> ) das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade após ajustamento simultâneo.....	A27
ANEXO 8 : Gráficos dos resíduos <i>studentizados</i> em função dos valores preditos das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade após ajustamento simultâneo .....	A31
ANEXO 9 : Gráficos de extremos e quartis ( <i>box-plot</i> ) dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade .....	A35

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Definição das classes de idade, de densidade e de índice de qualidade da estação.....	8
Tabela 2 – Distribuição dos dados do conjunto de ajustamento e de validação por regime e região climática.....	9
Tabela 3 – Distribuição dos dados de 1ª rotação do conjunto de ajustamento por classes de idade (clt), densidade (clN), índice de qualidade da estação (clS) e região climática.....	10
Tabela 4 – Distribuição dos dados de talhadia do conjunto de ajustamento por classes de idade (clt), densidade (clN), índice de qualidade da estação (clS) e região climática.....	11
Tabela 5 – Distribuição dos dados do conjunto de validação por regime, classes de idade (clt), densidade (clN), índice de qualidade da estação (clS) e região climática.....	12
Tabela 6 – Modelos seleccionados para cada componente de biomassa com a variável idade .....	20
Tabela 7 – Modelos seleccionados para cada componente de biomassa sem a variável idade .....	21
Tabela 8 – Ajustamento do sistema de equações com idade.....	22
Tabela 9 – Estimativas dos parâmetros no sistema de equações com idade .....	23
Tabela 10 – Ajustamento do sistema de equações sem idade.....	24
Tabela 11 – Estimativas dos parâmetros no sistema de equações sem idade .....	24
Tabela 12 – Percentagem de variação explicada ( $R^2$ ), média dos resíduos de predição (mrp) e média absoluta dos resíduos de predição (marp).....	25
Tabela 13 – Modelos finais para cada componente de biomassa com a variável idade.....	26
Tabela 14 – Modelos finais para cada componente de biomassa sem a variável idade.....	27
Tabela 15 – Caracterização dos dados de 1ª rotação do conjunto de ajustamento por região climática .....	A2
Tabela 16 – Caracterização dos dados de talhadia do conjunto de ajustamento por região climática	A2
Tabela 17 – Caracterização dos dados de 1ª rotação do conjunto de validação por região climática.	A3
Tabela 18 – Caracterização dos dados de talhadia do conjunto de validação por região climática ....	A3
Tabela 19 – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de lenho com idade.....	A23
Tabela 20 – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de casca com idade .....	A23
Tabela 21 – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de ramos com idade.....	A24
Tabela 22 – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de folhas com idade .....	A24
Tabela 23 – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de lenho sem idade.....	A25
Tabela 24 – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de casca sem idade .....	A25
Tabela 25 – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de ramos sem idade.....	A26
Tabela 26 – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de folhas sem idade .....	A26

## Lista de figuras

Figura 1 – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da $h_{\text{dom}}$ (m) no conjunto de dados de ajustamento em 1ª rotação .....	A5
Figura 2 – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da $h_{\text{dom}}$ (m) no conjunto de dados de ajustamento em talhadia .....	A5
Figura 3 – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da $G$ ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) no conjunto de dados de ajustamento em 1ª rotação .....	A6
Figura 4 – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da $G$ ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) no conjunto de dados de ajustamento em talhadia .....	A6
Figura 5 – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da $h_{\text{dom}}$ (m) no conjunto de dados de validação em 1ª rotação .....	A7
Figura 6 – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da $h_{\text{dom}}$ (m) no conjunto de dados de validação em talhadia.....	A7
Figura 7 – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da $G$ ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) no conjunto de dados de validação em 1ª rotação.....	A8
Figura 8 – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da $G$ ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) no conjunto de dados de validação em talhadia .....	A8
Figura 9 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> da biomassa de lenho com idade .....	A10
Figura 10 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de casca com idade .....	A10
Figura 11 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de ramos com idade.....	A10
Figura 12 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de folhas com idade .....	A11
Figura 13 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de lenho sem idade.....	A11
Figura 14 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de casca sem idade .....	A11
Figura 15 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de ramos sem idade.....	A12
Figura 16 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de folhas sem idade .....	A12
Figura 17 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de lenho com idade .....	A14

Figura 18 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de casca com idade.....	A14
Figura 19 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de ramos com idade .....	A14
Figura 20 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de folhas com idade .....	A15
Figura 21 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de lenho sem idade .....	A15
Figura 22 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de casca sem idade.....	A15
Figura 23 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de ramos sem idade .....	A16
Figura 24 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de folhas sem idade .....	A16
Figura 25 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de lenho com idade.....	A18
Figura 26 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de casca com idade .....	A18
Figura 27 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de ramos com idade .....	A19
Figura 28 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de folhas com idade.....	A19
Figura 29 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de lenho sem idade.....	A20
Figura 30 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de casca sem idade.....	A20
Figura 31 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de ramos sem idade .....	A21
Figura 32 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de folhas sem idade.....	A21
Figura 33 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de lenho com idade.....	A28
Figura 34 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de casca com idade .....	A28
Figura 35 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de ramos com idade.....	A28

Figura 36 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de folhas com idade .....	A29
Figura 37 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de lenho sem idade .....	A29
Figura 38 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de casca sem idade .....	A29
Figura 39 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de ramos sem idade .....	A30
Figura 40 – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos <i>studentizados</i> do modelo da biomassa de folhas sem idade .....	A30
Figura 41 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de lenho com idade .....	A32
Figura 42 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de casca com idade .....	A32
Figura 43 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de ramos com idade .....	A32
Figura 44 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de folhas com idade .....	A33
Figura 45 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de lenho sem idade .....	A33
Figura 46 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de casca sem idade .....	A33
Figura 47 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de ramos sem idade .....	A34
Figura 48 – Relação gráfica entre os resíduos <i>studentizados</i> e as estimativas do modelo da biomassa de folhas sem idade .....	A34
Figura 49 – Gráficos de extremos e quartis ( <i>box-plot</i> ) dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de lenho com idade .....	A36
Figura 50 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de lenho com idade .....	A36
Figura 51 – Gráficos <i>box-plot</i> dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de casca com idade .....	A36
Figura 52 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de casca com idade .....	A36
Figura 53 – Gráficos <i>box-plot</i> dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de ramos com idade .....	A37

Figura 54 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de ramos com idade.....	A37
Figura 55 – Gráficos <i>box-plot</i> dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de folhas com idade .....	A37
Figura 56 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de folhas com idade .....	A37
Figura 57 – Gráficos <i>box-plot</i> dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de lenho sem idade .....	A38
Figura 58 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de lenho sem idade.....	A38
Figura 59 – Gráficos <i>box-plot</i> dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de casca sem idade .....	A38
Figura 60 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de casca sem idade .....	A38
Figura 61 – Gráficos <i>box-plot</i> dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de ramos sem idade.....	A39
Figura 62 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de ramos sem idade.....	A39
Figura 63 – Gráficos <i>box-plot</i> dos resíduos de predição em função das classes de idade, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de folhas sem idade .....	A39
Figura 64 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de folhas sem idade .....	A39



## Lista de abreviaturas e símbolos

Símbolo	Descrição	Unidades
BEF	Factor de Expansão de Biomassa	Mg m <sup>-3</sup>
G	Área basal de todas as árvores vivas	m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>
hdom	Altura dominante	m
IFN	Inventário Florestal Nacional	-
N	Densidade, expressa como número de árvores ou de varas vivas por ha	ha <sup>-1</sup>
rot	Rotação	-
S	Índice de Qualidade da Estação	m
t	Idade	anos
Ww	Biomassa de lenho estimada	Mg ha <sup>-1</sup>
Wb	Biomassa de casca estimada	Mg ha <sup>-1</sup>
WI	Biomassa de folhas estimada	Mg ha <sup>-1</sup>
Wbr	Biomassa de ramos estimada	Mg ha <sup>-1</sup>
Wa	Biomassa aérea total estimada	Mg ha <sup>-1</sup>



## 1. Introdução

A *Eucalyptus globulus*, árvore nativa da Austrália, foi introduzida em Portugal na década de 1850. Inicialmente com interesse apenas ornamental, não tardou a chamar a atenção da silvicultura, não só pelas suas características, mas também pela necessidade, particularmente a partir de 1870, de plantas para arborizar o país. Utilizada de forma mais ou menos intensiva, foi só a partir de 1926, com o arranque da laboração da primeira fábrica portuguesa – e presumivelmente também mundial – que utilizava o eucalipto como matéria-prima para a pasta do papel, que esta espécie começou a ganhar realmente importância, tendo suplantado todas as outras espécies como matéria-prima para a indústria da celulose (Radich, 2007). A partir dessa altura, tem-se assistido a um crescimento mais ou menos paralelo da indústria de celulose e da área de plantações, tendo esta crescido desde cerca de 100 000 ha existentes na década de 1960 (DGFSa 1966a, 1966b) até aos cerca de 717 432 ha de povoamentos puros e mistos dominantes adultos e jovens existentes actualmente (Tomé et al. 2007), valor apurado no Inventário Florestal Nacional (IFN) 2005-2006.

O Protocolo de Kyoto trouxe uma necessidade crescente de informação sobre o carbono, principalmente sobre os stocks existentes nas florestas, por serem estas o ecossistema terrestre que mais impacto tem na mitigação do aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico por via do armazenamento. Esta necessidade tem tornado a estimação da biomassa florestal uma questão relevante, não só em termos da estimação dos stocks de carbono, mas também ao nível dos ciclos biogeoquímicos, pois a quantidade de diferentes elementos presentes na floresta está relacionada com a quantidade de biomassa presente. Esta informação torna-se mais importante ainda no caso de espécies de crescimento rápido e que são geridas de forma intensiva sob regimes de curtas revoluções, como é o caso da *Eucalyptus globulus*.

As variações dos stocks de carbono podem ser medidas directamente implicando, contudo, um elevado número de medições ao longo do tempo e do espaço, razão pela qual se tem procurado obter a informação necessária através de modelos que permita estimar a biomassa com base em dados facilmente obtíveis, como seja o caso dos inventários florestais. Assim, decidiu-se de algum modo continuar o trabalho desenvolvido no modelo Globulus 3.0 e, utilizando o conjunto de dados disponíveis (incluindo vários ensaios estabelecidos ao longo do tempo), ajustar equações de predição de biomassa facilmente utilizáveis com os dados de inventário, ou seja, considerando como possíveis variáveis regressoras apenas aquelas que são tradicionalmente incluídas nos resultados dos inventários florestais e/ou fazem parte do output usual dos modelos de crescimento e

produção, como sejam a densidade, a altura dominante, a área basal ou a idade. Uma análise um pouco mais cuidada dos resultados do IFN revelou que a idade nem sempre é uma variável fácil de obter, pelo que se decidiu ajustar dois sistemas de equações, um com idade e outro sem esta variável. O sistema de equações a desenvolver representa uma melhoria em relação às equações apresentadas no modelo GLOBULUS 3.0 por duas razões:

1) Pretende desenvolver-se um sistema mais robusto, ou seja, mais preciso e menos enviesado e em que haja a garantia da coerência das predições em situações distintas, quer em termos de características do povoamento, quer ambientais; para isso há que simplificar, em relação ao sistema inicial de equações, as expressões que modelam a dependência dos parâmetros de factores ambientais e variáveis do povoamento.

2) Pretende-se utilizar no ajustamento dos modelos técnicas estatísticas mais sofisticadas, por exemplo, que tenham em conta a estrutura de autocorrelação dos erros e corrijam a heterocedasticidade e não normalidade dos erros que se encontraram praticamente em todos os sub-modelos.

Note-se que os modelos que se pretendem obter nesta tese são para aplicação ao nível do povoamento, ou seja, modelos que podem ser aplicados quer a dados de inventário não processados, quer ao mesmo tipo de dados já processados (ou seja, quando o utilizador não tem acesso aos dados base das medições realizadas nas árvores individuais), quer ainda aos resultados de simulações com modelos de crescimento cuja unidade de simulação é o povoamento.

## 2. Revisão bibliográfica

As estimativas de biomassa de povoamentos florestais são uma fonte de informação valiosa, não só em termos dos ciclos de nutrientes, como avaliação de quantidade para a indústria, mas também para estudos de sequestro de carbono e quantificações energéticas, como avaliação de quantidade de produto mercantil, mas conseguir estimativas fiáveis e a uma escala relevante, como seja o povoamento, nem sempre se tem revelado uma tarefa fácil.

O recurso a técnicas de detecção remota tem atraído atenção, principalmente devido à redução de tempo e custo quando comparado com a recolha de dados no campo especificamente para este objectivo (Bettinger e Hayashi, 2006). Embora estas técnicas tenham apresentado algum sucesso, à medida que a complexidade da estrutura das florestas aumenta, as estimativas começam a ser cada vez menos fiáveis, sendo sempre necessária informação extra ao nível dos povoamentos, não só para aumentar a fiabilidade das estimativas (Bettinger e Hayashi, 2006), mas também para a calibração e validação (Schroeder et al. 1997). A estimação da biomassa recorrendo a detecção remota continua a constituir um desafio, sendo ainda necessária muita investigação para compreender e identificar as falhas deste processo de estimação de biomassa e diminuir as incertezas resultantes do mesmo (Lu, 2006).

A recolha de dados no campo continua a ser considerada a opção mais precisa para fazer estimativas de biomassa aérea (Bettinger e Hayashi, 2006). A opção de recorrer a medições directas de biomassa em parcelas é apenas eficaz em pequena escala, sendo o recurso a dados de inventário florestal combinados com modelos para a estimação da biomassa a melhor opção para estimar biomassa de povoamentos florestais. Os dados de inventário são recolhidos a uma grande escala, incluem normalmente todas as populações de interesse e o método de recolha da informação está feito de modo a que os dados sejam estatisticamente válidos, sendo que estão facilmente disponíveis e em quantidade suficiente (Schroeder et al. 1997).

Utilizar dados ao nível da árvore ou da parcela, recorrendo a equações alométricas que convertem as medições realizadas no campo, como a altura da árvore ou o diâmetro à altura do peito em volumes ou biomassas torna-se um trabalho mais demorado. Alguns autores preferem utilizar as estimativas de volume ao nível dos povoamentos e convertê-las em estimativas de biomassas, recorrendo a Factores de Expansão da Biomassa (BEF's), definidos como a razão entre a biomassa do povoamento e o seu volume e que permitem fazer directamente esta conversão (por exemplo Schroeder et al. 1997, Brown et al. 1999, Fang et al. 2001). Muito embora seja uma forma relativamente expedita de calcular

biomassas ao nível do povoamento, os valores dos BEF's são muito variáveis – variam com a espécie, a idade, o local, as características do povoamento e também com o volume – e implicam sempre o cálculo da variável volume, o que já traz algum erro associado. Neste caso a utilização de equações de regressão com base em parâmetros do povoamento é um método mais vantajoso.

Na bibliografia podemos encontrar diferentes modelos para a estimação de biomassa ao nível do povoamento:

- equações de regressão para a acumulação de biomassa com o tempo desenvolvidas a partir de dados de inventário florestal (assumindo biomassa zero na idade zero) versus t (idade) (Grierson et al. 1992);

- quando se considera que a biomassa da árvore pode ser predita utilizando uma relação linear entre a biomassa e medições ao nível da árvore, então, ao nível do povoamento, existe igualmente uma relação linear entre a biomassa, a densidade e várias outras variáveis do povoamento. A variável do povoamento mais utilizada é a área basal, que por si só é um bom estimador da biomassa do povoamento, embora a utilização de outras variáveis como a idade possam melhorar a estimativa (Snowdon et al. 2000);

- segundo Clutter et al. (1983) podem ser usadas funções explícitas para prever a produção actual em termos de volume ou biomassa, usando as variáveis altura do povoamento, um indicador da densidade do povoamento, a área basal, a idade e o índice de qualidade da estação. Segundo este princípio, Barrio-Anta et al. (2006) consideraram razoável relacionar a produção do povoamento com o produto da biomassa ou do volume de uma árvore representativa – dada pelo diâmetro quadrático médio e altura dominante – e o número de árvores por hectare e estimar a biomassa ou o volume do povoamento a partir destas variáveis. Deste modo é possível obter uma estimativa da biomassa ou do volume do povoamento a partir do diâmetro quadrático médio, da altura dominante e da densidade. Este método é muito semelhante à técnica da árvore média desenvolvida durante os anos 60 e 70 por diversos investigadores (Baskerville, 1965; Attiwill e Ovington, 1968; Crow, 1971; Madgwick e Satoo, 1975) e segundo a qual se pode obter uma estimativa da biomassa total dum povoamento calculando a biomassa da árvore média (considerando que uma árvore de tamanho médio tem também uma quantidade média de biomassa) e multiplicando esse valor pelo número de árvores do povoamento.

- no trabalho de Monserud et al. (1996) com o objectivo de ajustar equações para as diferentes componentes de fitomassa de *Pinus sylvestris* L., ao nível do povoamento, a partir das variáveis disponíveis em inventário florestal podemos encontrar uma recolha de modelos para povoamentos na Rússia. Semechkina (1978) concluiu que a fitomassa de

lenho pode ser predita por uma função da área basal; a fitomassa de ramos por uma função do diâmetro médio do povoamento e a fitomassa de agulhas por uma função da idade do povoamento. Gorbatenko (1970) concluiu que a área basal e o volume do povoamento eram as melhores variáveis para prever a fitomassa de lenho, raízes, copa e agulhas. Kusikov (1979) estudou vários modelos regionais lineares e não lineares que prediziam a fitomassa como função da idade do povoamento, altura e área basal. Usol'tsev (1988) estudou a estrutura da fitomassa baseando-se na razão Fitomassa/Volume e encontrou como preditores a idade do povoamento, a densidade e o índice de qualidade da estação. Sendo a idade do povoamento, o índice de qualidade da estação e o volume de lenho com casca os parâmetros mais consistentemente listados nas publicações analisadas, foram estas as variáveis escolhidas para as equações de fitomassa em Monserud et al. (1996).

- no modelo empírico Globulus 2.1, desenvolvido por Tomé et al. (2001), foram ajustados sistemas de equações alométricas para a estimação das biomassas totais e por componentes ao nível da árvore (com base na hipótese da existência de relações alométricas entre a biomassa total ou de cada uma das componentes consideradas e o diâmetro e altura total da árvore), e ao nível do povoamento. Foram consideradas como variáveis das equações ao nível do povoamento a altura dominante, a área basal, o índice de qualidade da estação, a densidade e a idade. Já no modelo Globulus 3.0 (Tomé et al. 2006), desenvolvido no âmbito do projecto GLOBLAND (POCTI/AGG/42211/2001), as variáveis escolhidas nos ajustamentos das equações de biomassa das componentes foram a área basal, a altura dominante, a rotação, a densidade, o índice de qualidade da estação e a idade.

### **3. Dados**

#### **3.1 Descrição**

No âmbito do projecto GLOBLAND foi feita uma análise exaustiva dos dados disponíveis de eucalipto os quais foram verificados e validados, tendo sido seleccionados os seguintes para integração do sistema de equações de biomassa para o eucalipto a desenvolver no âmbito desta tese:

- Parcelas permanentes da SILVICAIMA – medições de 1995 a 2003 (Oliveira e Aires, 2005b)
- Ensaios de compassos da CELBI e do ISA : Alto do Vilão, Quinta do Paço e Vilar de Luz (Tomé, 1988 ; Carvalho, 1999 e Oliveira e Aires, 2005a)
- As parcelas testemunhas e fertilizadas do ensaio de fertilização e rega instalado pela CELBI em colaboração com o ISA (Pereira et al. 1989)
- Dados do inventário florestal contínuo da SILVICAIMA – medições de 1998 a 2004 (Oliveira e Aires, 2005b)
- Dados do inventário florestal contínuo da PORTUCEL – medições de 1989 a 1994 (Falcão, 1998 e Tomé et al. 2001) e as medições de 2000 e 2001, as mais recentes que estavam disponíveis e que tínhamos a garantia que correspondiam a medições da mesma parcela
- Parcelas permanentes da CELBI – medições de 1970 a 2002 (Tomé, 1988; Carvalho, 1995; Carvalho, 1999 e Oliveira e Aires, 2005a), tendo sido excluídas as parcelas instaladas em povoamentos plantados antes de 1965 e que correspondiam a plantações com técnicas diferentes das actuais.

Foram utilizados apenas os dados relativos a medições anuais e optou-se por excluir os dados provenientes de povoamentos clonais, uma vez que estes eram em número extremamente reduzido, não permitindo uma análise segura da necessidade de incluir a constituição genética nas diversas componentes do modelo.

Os dados utilizados são provenientes de parcelas permanentes e ensaios com várias medições ao longo do tempo, assim como de inventários florestais contínuos das empresas de celulose, o que teve implicações em termos das variáveis a utilizar no desenvolvimento do mesmo. A mais importante relaciona-se com o facto de no inventário florestal das empresas apenas se contarem as árvores ou varas com diâmetro inferior a 5 ou 6cm (consoante a empresa), não havendo registos do respectivo diâmetros, enquanto que



nalguns ensaios esta informação está disponível, pois são medidas todas as árvores. Isso levou a que na altura do tratamento prévio dos dados se tivesse optado por utilizar todas as medições de árvores vivas, atribuindo um valor de diâmetro de 3,75 cm (o valor central do intervalo 2,5-5 cm) a todas as árvores ou varas vivas sem medição de diâmetros, visto que, regra geral, no conjunto de dados considerados, só foram efectuadas medições de diâmetro em árvores ou varas com mais de 5 cm de diâmetro e foram contadas todas as árvores ou varas com diâmetro entre 2,5 e 5 cm. As árvores ou varas com diâmetro inferior a 2,5 cm apresentam secção irregular, pelo que não costumam ser consideradas (Oliveira e Aires, 2005b).

Cada registo utilizado no desenvolvimento do modelo corresponde a um conjunto de variáveis resultantes do processamento dos dados da medição de uma parcela permanente ou de uma parcela de inventário em que foram consideradas todas as árvores ou varas vivas, independentemente da sua dimensão, com valores da altura reais quando medidos no campo e estimados quando inexistentes, usando equações hipsométricas ajustadas propositadamente para o ensaio/parcela em questão (Oliveira e Aires, 2005a) ou, na falta destas, a equação ajustada por Soares e Tomé (2002). O cálculo das biomassas foi feito ao nível da árvore individual, utilizando as equações de António et al. (2007) ou, quando não existiam medições de diâmetro ou a altura da árvore era inferior a 3 m, as equações de Cortiçada et al. (2005). Quando não existiam medições efectuadas no campo da altura da base da copa, variável necessária para o cálculo da profundidade da copa e, consequentemente, das biomassas de ramos e folhas, utilizou-se a equação da proporção de copa de Soares e Tomé (2001). O Índice de qualidade da estação foi calculado ao nível da parcela, utilizando a equação de crescimento em altura dominante ajustada para o modelo Globulus 2.1 (Tomé et al., 2001) e considerando o Índice de qualidade da estação como a altura dominante aos 10 anos. Para cada registo foram então consideradas:

- Identificação da parcela e da medição, incluindo talhão, parcela e a respectiva região climática de acordo com a zonagem proposta por Ribeiro e Tomé (2000), daqui em diante referida apenas como região climática.
- Ano da medição e idade (t) em anos
- Rotação (rot): definida com base numa variável indicatriz da talhadia
- Densidade (N), definida como o número total de árvores ou varas vivas, independentemente da sua dimensão ( $\text{ha}^{-1}$ )
- Altura dominante (m) ( $h_{\text{dom}}$ )
- Área basal de todas as árvores ou varas vivas, independentemente da sua dimensão ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) (G)

- Índice de qualidade da estação (m) (S), calculado
- Biomassa de lenho de todas as árvores ou varas vivas, independentemente da sua dimensão ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) (Ww)
- Biomassa de casca de todas as árvores ou varas vivas, independentemente da sua dimensão ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) (Wb)
- Biomassa de folhas de todas as árvores ou varas vivas, independentemente da sua dimensão ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) (Wl)
- Biomassa de ramos de todas as árvores ou varas vivas, independentemente da sua dimensão ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) (Wbr)
- Biomassa aérea total de todas as árvores ou varas vivas, independentemente da sua dimensão ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) (Wa)

Devido ao elevado número de dados disponíveis, decidiu-se fazer a sua distribuição por rotação, regiões climáticas e por classes de idade, de densidade e de índice de qualidade da estação, segundo os valores descritos na Tabela 1.

**Tabela 1** – Definição das classes de idade, de densidade e de índice de qualidade da estação

Classes de idade		Classes de densidade		Classes de índice de qualidade da estação	
clt	idade (anos)	clN	densidade ( $\text{ha}^{-1}$ )	clS	índice de qualidade da estação
1	$t \leq 4$	1	$N \leq 1111$	1	$S \leq 16$
2	$4 < t \leq 8$	2	$1111 < N \leq 1667$	2	$16 < S \leq 20$
3	$8 < t \leq 12$	3	$N > 1667$	3	$20 < S \leq 24$
4	$t > 12$			4	$S > 24$

Após a distribuição dos dados, verificou-se que existiam algumas classes, principalmente aquelas correspondentes às zonas do país com uma maior presença do eucalipto, que continham uma grande quantidade de observações, tendo-se optado por utilizar no desenvolvimento do modelo um máximo de 100 observações por classe e retirar as restantes para um conjunto de validação.

Para seleccionar os dados, as medições relativas à mesma parcela foram agrupadas por rotação e ordenadas segundo a idade. Seguidamente foi contabilizado para cada parcela o número de medições existentes ao longo do tempo, tendo sido este o critério de separação das observações, ou seja, em todas as classes com mais de 100 observações, as parcelas com o menor número de medições ao longo do tempo foram retiradas para o conjunto de

validação, ficando no conjunto de ajustamento apenas as 100 observações relativas às parcelas com o maior número de medições. Foram assim preferidas as medições de parcelas permanentes (medições mais precisas) para o conjunto de ajustamento, tendo sido também seleccionadas, quando necessário para completar o número pretendido de 100 observações, as parcelas de inventário com o maior número de medições ao longo do tempo, de forma a que os dados tivessem todos uma estrutura semelhante.

No final ficou-se com 12603 medições no conjunto de ajustamento (6564 de primeira rotação e 6039 de talhadas) e 7623 medições no conjunto de validação (3972 de primeira rotação e 3651 de talhadas) (Tabela 2) cuja distribuição por rotação, classes de idade, densidade e de índice de qualidade da estação pode ser visto nas Tabelas 3 a 5.

**Tabela 2** – Distribuição dos dados do conjunto de ajustamento e de validação por regime e região climática

Regime	Região climática	Ajustamento	Validação
1ª rotação	1NL	126	
	2NC	754	
	3CL	2166	462
	4SL	724	240
	5VT	1923	3109
	6NI	459	6
	7SI	410	155
	8VD	2	
Total		6564	3972
Talhada	2NC	231	
	3CL	1734	673
	4SL	1073	371
	5VT	2157	2526
	6NI	540	
	7SI	302	81
	8VD	2	
Total		6039	3651

No Anexo 1 são apresentadas as caracterizações dos dados dos conjuntos de ajustamento e de validação por região climática e regime de exploração. Analisando as tabelas pode-se constatar que os dados são bastante representativos, cobrindo uma grande quantidade de situações em termos de idade, Índice de qualidade da estação, altura dominante, densidade e área basal.

No Anexo 2 encontramos a representação gráfica da relação entre as diferentes componentes de biomassa com a altura dominante e a área basal do conjunto de ajustamento e de validação.

**Tabela 3** – Distribuição dos dados de 1ª rotação do conjunto de ajustamento por classes de idade (clt), densidade (clN), índice de qualidade da estação (clS) e região climática

clt	clN	clS	Região climática								Total
			1NL	2NC	3CL	4SL	5VT	6NI	7SI	8VD	
1	1	1		1	2		15	1	1		20
		2			23	3	52		2		80
		3		1	45	1	43				90
		4	4	2	20		1				27
	2	1			3		2				5
		2			13	5	45				63
		3		2	51	4	42				99
		4	4	8	15		2				29
	3	2			6						6
		3	3	9	36						48
		4	13	4	12						29
2	1	1		7	68	18	96	42	36		267
		2	1	18	100	100	100	45	63	2	429
		3		23	100	83	100	12	19		337
		4	8	3	50	8	72	1			142
	2	1	2	10	21	2	69	11	4		119
		2	9	44	56	35	100	24	38		306
		3	1	43	73	35	100	13	10		275
		4	9	13	58	5	40	2			127
	3	1			3		2				5
		2		16	17		4				37
		3		21	26		8		1		56
		4	32	2	33		1				68
	1	1		32	100	64	100	100			396
		2		19	100	100	100	62	100		481
		3		58	100	100	100	12	27		397
		4	3	49	84	24	100		2		262
	2	1	1	20	45	11	90	56	4		227
		2	4	52	91	46	100	53	26		372
		3		93	100	49	100	11	13		366
		4	9	75	77	11	16	3			191
	3	1		7	22		2	2			33
		2		11	68	2	5	9			95
		3	2	24	30	4	9				69
		4	15	13	21		1				50
4	1	1		4	24	4	61		15		108
		2		3	44	5	100		30		182
		3		9	100	5	51		8		173
		4	1	1	60		13		2		77
	2	1		6	33		14				53
		2		19	37		40		6		102
		3	1	15	41		21		2		80
		4	1	12	12		3		1		29
	3	1		5	36						41
		2			32		2				34
		3			53		1				54
		4	3		25						28
	Total		126	754	2166	724	1923	459	410	2	6564

**Tabela 4** – Distribuição dos dados de talhadia do conjunto de ajustamento por classes de idade (clt), densidade (clN), índice de qualidade da estação (clS) e região climática

			Região climática							
clt	cIN	cIS	2NC	3CL	4SL	5VT	6NI	7SI	8VD	Total
1	1	1		2	1	80				83
		2		33	36	100				169
		3	1	16	6	7				30
		4		1						1
	2	1		2		37				39
		2	3	57	7	100				167
		3	3	48	2	8				61
		4	1	1						2
	3	1				9				9
		2	4	50	2	24				80
		3	9	57	1	2				69
		4		1						1
2	1	1		16	36	100	15	21		188
		2	14	100	44	100	25	4		287
		3	7	100	9	100	4	1		221
		4		23	1	13				37
	2	1	2	15	21	100	15	3		156
		2	32	100	42	100	53	8		335
		3	22	100	21	100	14	3		260
		4	2	45	2	11				60
	3	1	2	2	9	39	6			58
		2	16	52	17	100	44	1		230
		3	30	69	25	46	14	1		185
		4	1	1	2	2		1		7
3	1	1		20	100	98	65	100		383
		2	2	100	98	100	49	83		432
		3	2	100	42	100	9	17		270
		4	1	46	7	16		2		72
	2	1	1	8	100	87	34	33		263
		2	7	100	100	100	92	17	2	418
		3	6	100	100	100	11	5		322
		4	3	61	26	65		1		156
	3	1	2	1	46	9	15			73
		2	7	80	67	58	65			277
		3	29	92	32	100	10	1		264
		4	22	10	7	21				60
4	1	1		1	3	6				10
		2		9	8	10				27
		3		7	4	7				18
		4			2					2
	2	1			3	5				8
		2		10	13	23				46
		3		39	21	16				76
		4		22	4	20				46
	3	1		3		3				6
		2		21	2	6				29
		3		13	3	14				30
		4			1	15				16
Total			231	1734	1073	2157	540	302	2	6039

**Tabela 5** – Distribuição dos dados do conjunto de validação por regime, classes de idade (clt), densidade (cIN), índice de qualidade da estação (cIS) e região climática

				Região climática					
regime	clt	cIN	cIS	3CL	4SL	5VT	6NI	7SI	Total
1ª rotação	2	1	1			102			102
			2	38	5	445			488
			3	33		268			301
		2	2			192			192
			3			133			133
	3	1	1	32		356	6	136	530
			2	114	138	938		19	1209
			3	189	97	356			642
			4			12			12
		2	2			193			193
			3	22		46			68
	4	1	2			68			68
			3	34					34
Total				462	240	3109	6	155	3972
Talhadia	1	1	2			14			14
		2	2			16			16
	2	1	1			250			250
			2	69		533			602
			3	134		127			261
		2	1			120			120
			2	89		498			587
			3	124		100			224
	3	3	2			25			25
		1	1		41			81	122
			2	47		178			225
			3	82		101			183
		2	1		106				106
			2	18	189	280			487
			3	110	35	276			421
		3	3			8			8
Total				673	371	2526		81	3651
Total Global				1135	611	5635	6	236	7623

## **4. Metodologia**

### **4.1 Selecção de um modelo base**

Sendo o objectivo deste trabalho tentar, de alguma forma, melhorar o sistema de equações para a predição de biomassas desenvolvido no modelo Globulus 3.0 simplificando as equações, os modelos e as variáveis a testar estavam já definidos à partida: desenvolver equações alométricas do tipo

$$W = a G^b h^{dom^c}$$

onde a, b e c são expressos como funções lineares de variáveis do povoamento. Da bibliografia foram seleccionadas as variáveis mais frequentemente referidas, tendo o cuidado de escolher variáveis facilmente acessíveis (por intermédio de inventários florestais, por exemplo) para garantir a aplicabilidade das equações desenvolvidas.

### **4.2 Selecção de uma formulação do modelo alométrico para cada componente de biomassa**

No trabalho desenvolvido para o ajustamento das equações de biomassa do modelo Globulus 3.0 foram testadas várias variáveis do povoamento, sendo que apenas as variáveis t, N, S e rot se revelaram significativas. Da bibliografia retirou-se que as variáveis mais consistentemente utilizadas em equações de predição da biomassa ao nível do povoamento eram hdom, G, t, N, S e rot.

Para cada parâmetro (a, b e c) foi então testada a hipótese de estes serem combinações lineares das variáveis t, N, S e rot (variável indicatriz que toma o valor 0 em povoamentos em 1ª rotação e o valor 1 em povoamentos em talhadia).

As equações para as diferentes componentes da biomassa do povoamento foram ajustadas com o mesmo conjunto e número de dados.

Muito embora o conjunto de variáveis envolvidas seja pequeno, se forem consideradas todas as possíveis combinações simples entre elas e o facto de existirem 3 parâmetros diferentes nos quais podemos testar a influência destas variáveis, vamos obter um número considerável de modelos alternativos. Além disso, nos modelos mais complexos e com um maior número de interacções entre as variáveis torna-se não só difícil analisar o significado biológico das estimativas encontradas, como existe a possibilidade de estas poderem ser afectadas pela existência de correlações entre os parâmetros, tornando-os mais instáveis e com uma capacidade preditiva inferior relativamente a outros modelos mais simples. Para ultrapassar este problema, e para de algum modo reduzir o número de modelos a testar, foi decidido testar o efeito de uma determinada variável num só parâmetro da equação em cada ajustamento, o que permitiu igualmente ultrapassar a impossibilidade da análise da

lógica dos sinais das estimativas dos coeficientes da equação quando a mesma variável era considerada em mais do que um parâmetro.

O ajustamento e a avaliação dos modelos foram efectuados com recurso a programas desenvolvidos no SAS statistical software (SAS Institute Inc., 2004) e decidiu-se fazer a selecção das equações para cada componente da biomassa em 2 fases.

Numa primeira fase foram testados vários modelos que diferiam entre si nas expressões dos parâmetros em função de variáveis do povoamento. Numa tentativa de obter modelos o mais robustos possíveis, optou-se por apenas incluir as variáveis associadas a parâmetros cujas estimativas nos diferentes ajustamentos mantinham o sinal constante, sendo este sinal consistente do ponto de vista biológico.

O ajustamento dos modelos nesta fase foi feito pelo método dos mínimos quadrados, sob a forma não linear, com recurso ao procedimento PROC NLIN (SAS Institute Inc., 1999). A avaliação e selecção do modelo baseou-se nos seguintes critérios:

- o comportamento biológico foi avaliado com base na correcção dos sinais das estimativas dos parâmetros;
- a capacidade de ajustamento do modelo foi avaliada com base na soma de quadrados dos resíduos ( $SQR$ ) e na % de variação explicada ( $R^2$ )

$$SQR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \text{ soma de quadrados dos resíduos}$$

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \text{ \% de variação explicada}$$

onde  $y_i$  é a observação  $i$  ( $i=1, \dots, n$ ) da variável resposta do modelo,  $\hat{y}_i$  é o valor  $i$  ( $i=1, \dots, n$ ) estimado pelo modelo,  $\bar{y}$  é o valor médio dos valores observados e  $n$  o número total de observações.

A segunda fase consistiu no melhoramento do modelo seleccionado, tendo-se para isso recorrido ao procedimento PROC MODEL que, utilizando o algoritmo de Gauss-Newton e através de um processo iterativo, gera estimativas optimizadas para os vários parâmetros, minimizando simultaneamente a soma dos quadrados dos resíduos.

Dum modo geral detectou-se, na primeira fase o ajustamento e em todas as componentes do modelo, a não normalidade dos erros, na maior parte dos casos consequência de valores extremos fora do normal (distribuição com “pontas pesadas”). Para resolver este problema



e reduzir a influência dos dados com valores elevados de erros no ajustamento, as estimativas finais dos parâmetros foram obtidas com recurso ao método dos mínimos quadrados iterativamente ponderados com a função Huber (Myers, 1986). Esta regressão ponderada serviu também para ultrapassar o problema de heterocedasticidade que os dados de biomassa apresentam frequentemente. Segundo Parresol (1999), a variância dos erros não é constante para todas as observações, encontrando-se relacionada com uma ou mais variáveis independentes do modelo de regressão e para ultrapassar este problema de heterocedasticidade e desenvolver modelos de biomassa precisos, as equações devem ser ajustadas por regressão não linear ponderada.

Os problemas de autocorrelação, consequência da opção de utilizar preferencialmente medições de parcelas permanentes ou parcelas com séries de medições ao longo do tempo, foram resolvidos por modelação da estrutura de autocorrelação dos erros com base em modelos AR ou ARMA, consoante a componente de biomassa.

Os modelos auto-regressivos de média móvel (ARMA) são modelos matemáticos de autocorrelação numa série temporal e são normalmente usados quando existem resíduos auto-correlacionados. Uma parte dos modelos ARMA são os chamados modelos AR, ou modelos auto-regressivos. Estes modelos expressam uma série temporal como uma função linear dos seus valores passados e a ordem do modelo indica quantos valores passados estão incluídos. O modelo AR mais simples é o modelo AR(1) ou de primeira ordem, em que o valor actual da série depende apenas do valor da série no momento anterior e do resíduo. A segunda parte dos modelos ARMA são os modelos de média móvel (MA), nos quais o valor actual da série depende dos valores dos resíduos no momento actual e nos momentos anteriores. Assim, os modelos ARMA incluem os valores anteriores da série e os valores anteriores dos resíduos, sendo que a ordem destes modelos, indicada entre parênteses como ARMA(r,m) é constituída pelos valores r da ordem auto-regressiva e m da ordem de média móvel.

A avaliação baseou-se na análise dos pressupostos da regressão em relação ao modelo seleccionado:

1. Normalidade dos erros do modelo, avaliada com base no gráfico dos resíduos *studentizados* em papel de probabilidade normal (Normal QQ plot).
2. Homogeneidade da variância dos erros do modelo (heterocedasticidade), avaliada com base na análise visual do gráfico dos resíduos *studentizados* em função dos valores preditos.

Os resíduos, ao contrário dos erros, não têm todas a mesma variância, sendo esta a principal razão para a necessidade de serem *studentizados*. Um resíduo

*studentizado* é um resíduo ajustado dividindo o seu valor por uma estimativa do seu desvio padrão, sendo este processo de *studentização* dos resíduos uma técnica importante para a detecção de *outliers*. Tal como o seu nome indica, seguem uma distribuição t-student quando os erros estão normalmente distribuídos, o que faz com que tenham um papel importante nas definições e propriedades dos detectores clássicos de observações com influência nas predições dos modelos. Daí que tenham sido os escolhidos para fazer a avaliação do modelo.

3. Autocorrelação dos erros do modelo, avaliada pela análise dos gráficos dos resíduos em função dos resíduos anteriores de ordem 1, 2 e 3.
4. Foi feito também um diagnóstico de colinearidade recorrendo ao número de condição da matriz. O número de condição da matriz é o maior dos índices de condição, que são calculados como a raiz quadrada da razão entre o maior e o menor dos valores próprios (*eigenvalues*) da matriz das derivadas parciais em ordem a cada um dos parâmetros. Um valor próprio perto de zero ou um número de condição da matriz maior que 50 (30 para pessoas mais conservadoras) indicam a existência de relações lineares significativas entre as variáveis. Belsley et al. (1980) indicam inclusivamente os valores 30 como o ponto onde a colinearidade começa a afectar as estimativas e 100 como o ponto onde a colinearidade é já elevada.

Segundo Myers (1986), quanto mais próximo de zero se encontrar o menor dos valores próprios, mais forte é a dependência linear e quando o valor de condição da matriz é maior que a raiz quadrada de 1000, há indicações de multicolinearidade. Valores muito elevados evidenciam instabilidade dos coeficientes da regressão.

#### **4.3 Ajustamento simultâneo dos sistemas de equações**

O ajustamento individual das equações das diferentes componentes da biomassa aérea não garante que o somatório das mesmas represente o valor total da biomassa aérea. Para garantir que o seja, deve ser feito um ajustamento simultâneo das equações das componentes, impondo a restrição de que o seu somatório seja igual ao total da biomassa aérea.

Para garantir a compatibilidade das equações e garantir a propriedade da aditividade das equações não lineares de biomassa, cada componente deve ser calculada por uma regressão com as suas próprias variáveis independentes e a regressão para a biomassa aérea total deve ser expressa como o somatório das funções utilizadas para as outras componentes, podendo cada uma das regressões usar o seu próprio peso específico (Parresol, 1999).

Numa fase final, foi feito então para cada um dos sistemas de equações – com idade e sem idade – um ajustamento simultâneo das equações, considerando a estimativa da biomassa aérea total igual ao somatório das estimativas das biomassas das diferentes componentes e recorrendo ao método dos mínimos quadrados generalizados designado por “nonlinear seemingly unrelated regressions”, tal como descrito por Parresol (2001) e utilizando a opção ITSUR –“Iterative Seemingly Unrelated Regressions”- do procedimento PROC MODEL.

Todas as regressões foram ajustadas utilizando os pesos específicos determinados nos ajustamentos individuais, tendo sido feito um ajustamento individual para o modelo da biomassa aérea total, considerando as mesmas variáveis utilizadas nas outras componentes, por forma a obter o peso específico.

#### 4.4 Validação e caracterização da capacidade preditiva dos modelos

Finalmente foi feita uma avaliação da capacidade preditiva global de cada um dos sistemas, recorrendo ao conjunto de dados de validação e a estatísticas indicadoras do enviesamento e precisão do modelo, baseadas nos resíduos de predição. Um resíduo de predição para a observação  $i$  é a diferença entre um valor observado do conjunto de validação e o respectivo valor estimado com o modelo ajustado com o conjunto de ajustamento:

$$r_p = y_i - \hat{y}_i$$

Os resíduos de predição  $r_p$  foram analisados através de gráficos de extremos e quartis (*box-plot*) em função de variáveis consideradas importantes, neste caso, classes de t, S e N. Nestes gráficos são representados, para cada classe, o valor médio dos resíduos de predição assim como os correspondentes quartis, valores extremos correspondentes a uma distância da média superior a 1,5 da distância interquartil e os pontos com um resíduo de predição superior aos valores extremos. A sua análise permite avaliar, não só a eficiência, como também o enviesamento e precisão dos modelos.

Foram ainda calculadas as seguintes estatísticas globais para cada modelo:

1. Média dos resíduos de predição, a qual avalia o enviesamento dos modelos

$$\bar{r}_p = \frac{\sum_{i=1}^n r_p}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}$$

A média dos resíduos de predição deve ser próxima de zero.

2. Média do valor absoluto dos resíduos de predição, a qual avalia a precisão dos modelos

$$\overline{|r_p|} = \frac{\sum_{i=1}^n |r_p|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

A média do valor absoluto dos resíduos de predição deve ser pequena.

Foi feita também uma validação, recorrendo ao mesmo conjunto de validação, das equações de biomassa dos modelos Globulus 3.0 e Globulus 2.1, muito embora alguns dos dados deste conjunto de validação tenham sido utilizados no ajustamento das equações dos modelos Globulus 2.1 e Globulus 3.0.

## 5. Resultados

### 5.1 Modelos seleccionados para cada componente da biomassa

De todas as variáveis testadas, o S apresentou-se sempre como sendo significativo, embora tenha apresentado variações do sinal da estimativa do parâmetro em diferentes ajustamentos. Isto, juntamente com o facto de necessitar de ser calculado com recurso a equações e não ser uma variável que normalmente resulta dos inventários florestais, levou a que fosse rejeitado como variável para os ajustamentos.

De um modo geral, as equações para a predição das componentes de biomassa acabaram por ter quase sempre as mesmas variáveis nas expressões dos parâmetros: N e rot e, no caso do sistema de equações com idade, o t (Tabelas 6 e 7). Pode-se então concluir que fazendo um inventário simples de um povoamento e tendo apenas estas variáveis, se conseguem obter estimativas de biomassa.

Em ambos os sistemas, a rotação não é uma variável significativa para o modelo de predição de biomassa de folhas.

As estimativas dos parâmetros apresentam-se com sinais lógicos, os modelos são robustos e com boa capacidade de predição (os  $R^2$  sempre com valores superiores a 98%), os resíduos *studentizados* apresentam uma distribuição próxima da normal (Anexo 3), embora com pontas ligeiramente “pesadas”, principalmente nos casos das biomassas de ramos e folhas – figuras 11, 12, 15 e 16 –, não existe violação do pressuposto da homogeneidade da variância dos erros do modelo (Anexo 4) e a análise dos gráficos dos resíduos em função dos resíduos anteriores (Anexo 5) garante que não existe violação grave de nenhum dos pressupostos da regressão.

A colinearidade foi considerada como sendo moderada e dentro de valores aceitáveis (Anexo 6). No caso do sistema de equações com idade, os valores encontram-se entre 60 e 68 e entre 50 e 58 no caso das equações sem idade. Embora estes valores indiquem a existência de colinearidade, a análise das linhas correspondentes da matriz de colinearidade indica-nos que as variáveis com valores mais elevados e com indícios de relações lineares entre elas, são as constantes, ou seja, as que não estão associadas a nenhum parâmetro do povoamento e as que seria de esperar que apresentassem relação entre elas.

**Tabela 6** – Modelos seleccionados para cada componente de biomassa com a variável idade

Componente e modelo	Expressões dos parâmetros	Estrutura de autocorrelação
<p>Lenho</p> $Ww = aw G^{bw} hdom^{cw}$	$aw = aw0$ $bw = bw0 + bw1 \left( \frac{t}{1000} \right) + bw2 \left( \frac{N}{1000} \right) + bw3 \text{rot}$ $cw = cw0$	ARMA(2,2)
<p>Casca</p> $Wb = ab G^{bb} hdom^{cb}$	$ab = ab0$ $bb = bb0 + bb1 \text{rot} + bb2 \left( \frac{t}{1000} \right)$ $cb = cb0 + cb1 \left( \frac{N}{1000} \right)$	AR(1)
<p>Ramos</p> $Wbr = abr G^{bbr} hdom^{cbr}$	$abr = abr0 + abr1 \left( \frac{t}{1000} \right)$ $bbr = bbr0 + bbr1 \left( \frac{N}{1000} \right) + bbr2 \text{rot}$ $cbr = cbr0$	ARMA(2,2)
<p>Folhas</p> $Wl = al G^{bl} hdom^{cl}$	$al = al0$ $bl = bl0 + bl1 \left( \frac{N}{1000} \right)$ $cl = cl0 + cl1 \left( \frac{t}{1000} \right)$	ARMA(2,2)

**Tabela 7** – Modelos seleccionados para cada componente de biomassa sem a variável idade

Componente e modelo	Expressões dos parâmetros	Estrutura de autocorrelação
<p>Lenho</p> $Ww = aw G^{bw} hdom^{cw}$	$aw = aw0 + aw1 \text{ rot}$ $bw = bw0$ $cw = cw0 + cw1 \left( \frac{N}{1000} \right)$	ARMA(2,2)
<p>Casca</p> $Wb = ab G^{bb} hdom^{cb}$	$ab = ab0$ $bb = bb0 + bb1 \text{ rot}$ $cb = cb0 + cb1 \left( \frac{N}{1000} \right)$	ARMA(1,1)
<p>Ramos</p> $Wbr = abr G^{bbr} hdom^{cbr}$	$abr = abr0$ $bbr = bbr0 + bbr1 \left( \frac{N}{1000} \right) + bbr2 \text{ rot}$ $cbr = cbr0$	ARMA(2,2)
<p>Folhas</p> $Wl = al G^{bl} hdom^{cl}$	$al = al0$ $bl = bl0 + bl1 \left( \frac{N}{1000} \right)$ $cl = cl0$	ARMA(2,2)

## 5.2 Ajustamento simultâneo dos sistemas de equações

De um modo geral, como ambos os sistemas de equações apresentavam alguns problemas ao nível dos resíduos (Anexos 3 e 4), principalmente ao nível da biomassa de ramos e de folhas, optou-se por fazer as devidas correcções ao nível da ponderação utilizada. Foram então alterados os valores por forma a que os resíduos apresentassem uma distribuição mais próxima da normal (Anexo 7) e com uma variância mais homogénea (Anexo 8).

Relativamente à biomassa de ramos e folhas, foi feita uma análise ao nível da árvore para se tentar perceber o porquê de existência de alguns resíduos de maiores dimensões associados a idades mais jovens.

Tendo sido as biomassas ao nível do povoamento calculadas com base nas estimativas de biomassa efectuadas para cada árvore individualmente, uma análise a este nível permitiria perceber o porquê de só as biomassas de ramos e folhas apresentarem tantos problemas. Nesta análise foi feita uma comparação entre os valores de biomassa de ramos e folhas das árvores individuais calculados com os valores de altura de profundidade da copa medidos e os calculados com os valores de profundidade da copa estimados. Nas árvores de menores dimensões, a diferença entre os dois valores analisados é muito grande, sendo os valores de profundidade de copa estimados muito inferiores aos valores medidos.

Considerando a amplitude das diferenças, seria recomendável melhorar a equação de predição da proporção de copa e reajustar as equações de predição de biomassa de ramos e folhas do povoamento.

#### 5.2.1 Sistema de equações com idade

No ajustamento deste sistema houve uma alteração da estrutura de autocorrelação da biomassa de lenho, que era do tipo ARMA(2,2) antes do ajustamento simultâneo e que passou a ser do tipo ARMA(2,1).

A Tabela 8 resume a qualidade do ajustamento do sistema de equações com idade e, como se pode ver, os modelos de todas as componentes apresentam uma boa capacidade de predição, com valores  $R^2$  muito próximos de 1.

**Tabela 8** – Ajustamento do sistema de equações com idade

Variável	Graus de liberdade		Soma de quadrados dos erros SSE	$\sqrt{\text{do erro médio quadrático}}$ MSE	$R^2$ ajustado
	Modelo	Erro			
Ww	4,5	12597	16895,5	1,1581	0,9992
Ww, Huber		12597	4550,2	0,601	
Wbr	5	12596	358,9	0,1688	0,9968
Wbr, Huber		12596	106,8	0,0921	
WI	4,5	12597	552,8	0,2095	0,9914
WI, Huber		12597	197,3	0,1252	
Wb	3,5	12598	1094,7	0,2948	0,9969
Wb, Huber		12598	440,2	0,1869	

Para cada variável são apresentados os valores de SSE e RMSE sem e com ponderação (método de Huber)



A Tabela 9 mostra as estimativas dos parâmetros, assim como os correspondentes erros padrões e estatísticas t-Student associadas.

**Tabela 9** – Estimativas dos parâmetros no sistema de equações com idade

Componente	Parâmetros	Estimativas	Erros padrões	t-Student	P>t
Lenho	aw0	0,103667	0,000238	435,27	< 0,0001
	bw0	1,052064	0,000705	1491,92	< 0,0001
	bw1	-1,24657	0,0163	-76,43	< 0,0001
	bw2	-0,00925	0,000082	-112,94	< 0,0001
	bw3	-0,00121	0,000095	-12,74	< 0,0001
	cw0	1,160686	0,00104	1120,3	< 0,0001
Casca	ab0	0,030011	0,000183	163,91	< 0,0001
	bb0	1,158732	0,00203	570,7	< 0,0001
	bb1	-0,00825	0,000281	-29,39	< 0,0001
	bb2	1,963325	0,0533	36,87	< 0,0001
	cb0	0,817532	0,00271	301,85	< 0,0001
	cb1	-0,05238	0,000349	-150,04	< 0,0001
Ramos	abr0	0,267424	0,000701	381,58	< 0,0001
	abr1	-3,96359	0,0194	-204,62	< 0,0001
	bbr0	1,041999	0,000953	1093,27	< 0,0001
	bbr1	-0,01784	0,00016	-111,19	< 0,0001
	bbr2	-0,00203	0,000122	-16,63	< 0,0001
	cbr0	0,180999	0,00141	128,4	< 0,0001
Folhas	al0	1,035627	0,0042	246,72	< 0,0001
	bl0	1,040647	0,00128	815,47	< 0,0001
	bl1	-0,01446	0,000205	-70,69	< 0,0001
	cl0	-0,26205	0,00215	-122,04	< 0,0001
	cl1	-7,45486	0,0432	-172,5	< 0,0001

## 5.2.2 Sistema de equações sem idade

No ajustamento deste sistema houve uma alteração da estrutura de autocorrelação da biomassa de casca, que era do tipo ARMA(1,1) antes do ajustamento simultâneo e que passou a ser do tipo AR(1).

A Tabela 10 resume a qualidade do ajustamento do sistema de equações sem idade e, tal como no caso do sistema de equações com idade, os modelos apresentam uma boa capacidade de predição, embora com valores de  $R^2$  ligeiramente inferiores.

A Tabela 11 mostra as estimativas dos parâmetros, assim como os correspondentes erros padrões e estatísticas t-Student associadas.

**Tabela 10 – Ajustamento do sistema de equações sem idade**

Variável	Graus de liberdade		Soma de quadrados dos erros SSE	$\sqrt{\text{do erro médio quadrático}}$ MSE	$R^2$ ajustado
	Modelo	Erro			
Ww	4,5	12597	15459,8	1,2273	0,9992
Ww, Huber		12597	4674,1	0,3711	
Wbr	4,5	12597	526,8	0,0418	0,9953
Wbr, Huber		12597	203,2	0,0161	
WI	4	12597	863	0,0685	0,9866
WI, Huber		12597	408,9	0,0325	
Wb	3	12598	1100,9	0,0874	0,9969
Wb, Huber		12598	471,3	0,0374	

Para cada variável são apresentados os valores de SSE e RMSE sem e com ponderação (método de Huber)

**Tabela 11 – Estimativas dos parâmetros no sistema de equações sem idade**

Componente	Parâmetros	Estimativas	Erros padrões	t-Student	P>t
Lenho	aw0	0,110846	0,000235	471,11	< 0,0001
	aw1	-0,00024	0,000033	-7,35	< 0,0001
	bw0	1,019518	0,000643	1584,74	< 0,0001
	cw0	1,156937	0,00102	1137,54	< 0,0001
	cw1	-0,00845	0,000089	-94,87	< 0,0001
Casca	ab0	0,026218	0,000157	167,05	< 0,0001
	bb0	1,196402	0,00191	626,63	< 0,0001
	bb1	-0,00803	0,000306	-26,28	< 0,0001
	cb0	0,849988	0,00287	295,67	< 0,0001
	cb1	-0,05644	0,000376	-150,03	< 0,0001
Ramos	abr0	0,301525	0,000988	305,16	< 0,0001
	bbr0	0,996269	0,00128	778,81	< 0,0001
	bbr1	-0,01257	0,0002	-62,92	< 0,0001
	bbr2	-0,00298	0,000153	-19,51	< 0,0001
	cbr0	0,126303	0,00179	70,54	< 0,0001
Folhas	al0	1,456987	0,00658	221,4	< 0,0001
	bl0	0,987019	0,00168	587,54	< 0,0001
	bl1	-0,00797	0,000258	-30,89	< 0,0001
	cl0	-0,40648	0,00254	-159,73	< 0,0001

### 5.3 Validação e caracterização da capacidade preditiva do modelo

Quanto à capacidade preditiva global do modelo, não existem sinais de grande enviesamento (Tabela 12), nem no sistema com idade, nem no sistema sem idade, apresentando-se todos os modelos com precisão.

Os gráficos de extremos e quartis dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, (Anexo 9) evidenciam alguns pequenos desvios nalgumas classes, sendo contudo os modelos bastante precisos e sem evidência de enviesamentos graves. Os desvios são mais evidentes para as biomassas de ramos e folhas. Nestas componentes nota-se mesmo uma tendência de variação da precisão e ou enviesamento, principalmente nos modelos sem idade (Figuras 61 e 63).

Na comparação com os modelos Globulus 2.1 e 3.0 pode-se comprovar que realmente houve uma melhoria significativa da capacidade de predição das equações em relação ao modelo Globulus 2.1. Comparando a prestação dos modelos Globulus 3.0 e o sistema em que a variável idade foi considerada, observa-se que os dois sistemas não apresentam diferenças muito marcadas, mas com uma ligeira superioridade em relação do modelo desenvolvido na presente tese. A prestação do sistema sem idade é bastante razoável em comparação com os outros sistemas, que exigem a determinação desta variável no campo a qual, como já foi mencionado, nem sempre é possível.

**Tabela 12** – Percentagem de variação explicada ( $R^2$ ), média dos resíduos de predição (mrp) e média absoluta dos resíduos de predição (marp)

Componente		Modelo			
		Globulus 2.1	Globulus 3.0	com idade	sem idade
Ww	$R^2$	0,88677	0,99877	0,99873	0,99872
	mrp	-2,85079	0,03077	0,01797	-0,05790
	marp	5,42964	0,47077	0,47875	0,48857
Wb	$R^2$	0,77687	0,99019	0,99209	0,99219
	mrp	-0,92016	0,04751	0,01796	0,03325
	marp	1,16669	0,20725	0,18275	0,18568
Wbr	$R^2$	0,82422	0,99734	0,99791	0,99369
	mrp	1,09789	0,01035	0,00401	-0,00831
	marp	1,11201	0,07503	0,06364	0,12151
WI	$R^2$	0,81399	0,99408	0,99537	0,98643
	mrp	-0,53921	0,00285	0,00962	0,00294
	marp	0,77014	0,09270	0,08720	0,14709

## 6. Conclusão

Foram desenvolvidos dois sistemas de equações para a predição das componentes de biomassa aérea de povoamentos puros regulares de *Eucalyptus globulus* com um largo potencial de utilização por terem como variáveis dados facilmente obtíveis em inventários florestais. Mesmo com um número reduzido de variáveis – idade do povoamento, densidade e rotação - e equações algo simples, os sistemas de equações são precisos e com elevada capacidade preditiva.

As variáveis utilizadas – hdom, G e N – referem-se à totalidade de árvores vivas do povoamento, independentemente da sua dimensão e não apenas às árvores com diâmetro superior a 5 ou 7,5cm, valores utilizados na maioria dos inventários.

Na Tabela 13 encontram-se os modelos finais para as diferentes componentes de biomassa do sistema de equações com idade, encontrando-se as equações do sistema sem idade na Tabela 14.

**Tabela 13 – Modelos finais para cada componente de biomassa com a variável idade**

Componente e modelo	Expressões dos parâmetros
Lenho  $Ww = aw G^{bw} hdom^{cw}$	$aw = 0,103667$  $bw = 1,052064 - 1,24657 \left( \frac{t}{1000} \right) - 0,00925 \left( \frac{N}{1000} \right) - 0,00121 \text{ rot}$  $cw = 1,160686$
Casca  $Wb = ab G^{bb} hdom^{cb}$	$ab = 0,030011$  $bb = 1,158732 - 0,00825 \text{ rot} + 1,963325 \left( \frac{t}{1000} \right)$  $cb = 0,817532 - 0,05238 \left( \frac{N}{1000} \right)$
Ramos  $Wbr = abr G^{bbr} hdom^{cbr}$	$abr = 0,267424 - 3,96359 \left( \frac{t}{1000} \right)$  $bbr = 1,041999 - 0,01784 \left( \frac{N}{1000} \right) - 0,00203 \text{ rot}$  $cbr = 0,180999$
Folhas  $Wl = al G^{bl} hdom^{cl}$	$al = 1,035627$  $bl = 1,040647 - 0,01446 \left( \frac{N}{1000} \right)$  $cl = -0,26205 - 7,45486 \left( \frac{t}{1000} \right)$

**Tabela 14** – Modelos finais para cada componente de biomassa sem a variável idade

Componente e modelo	Expressões dos parâmetros
<p>Lenho</p> $Ww = aw G^{bw} hdom^{cw}$	$aw = 0,110846 - 0,00024 \text{ rot}$ $bw = 1,019518$ $cw = 1,156937 - 0,00845 \left( \frac{N}{1000} \right)$
<p>Casca</p> $Wb = ab G^{bb} hdom^{cb}$	$ab = 0,026218$ $bb = 1,196402 - 0,00803 \text{ rot}$ $cb = 0,849988 - 0,05644 \left( \frac{N}{1000} \right)$
<p>Ramos</p> $Wbr = abr G^{bbr} hdom^{cbr}$	$abr = 0,301525$ $bbr = 0,996269 - 0,01257 \left( \frac{N}{1000} \right) - 0,00298 \text{ rot}$ $cbr = 0,126303$
<p>Folhas</p> $Wl = al G^{bl} hdom^{cl}$	$al = 1,459687$ $bl = 0,987019 - 0,00797 \left( \frac{N}{1000} \right)$ $cl = -0,40648$

## Referências bibliográficas

- António, N., Tome, M., Tomé, J., Soares, P., Fontes, L. (2007). Effects of tree stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 895-906.
- Attwill, P.M., Ovington, J.D. (1968). Determination of forest biomass. *Forest Science* 14: 13-15.
- Barrio-Anta, M., Balboa, M., Castedo, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez-González, J.G. (2006). An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *Forest Ecology and Management* 223(1-3): 24-34.
- Baskerville, G.L. (1965). Estimation of dry weight of tree components and total standing crop in conifer stands. *Ecology* 46: 867-869.
- Belsley, D.A., Kuh, E., Welsch, R.E. (1980). *Regression diagnostics: Identifying Influential data and sources of collinearity*. John Wiley & Sons. New York.
- Bettinger P., Hayashi R. (2006). Estimation of above-ground biomass with remotely sensed imagery: A brief literature review. Research Note 25, Center for Forest Business, University of Georgia.
- Brown, S.L., Schroeder, P., Kern, J.S. (1999). Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management* 123: 81–90.
- Carvalho, A. (1995). *Competição Intraespecífica em Povoamentos de Eucalyptus globulus Labill.. Uma Aplicação a Índices de Competição Dependentes da Distância*. Dissertação para obtenção Grau de Mestre, Mestrado Produção Florestal, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Carvalho, A. (1999). *Modelação do Crescimento da Árvore em Eucaliptais em 1ª Rotação Localizados nas Regiões Norte e Centro Litoral*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Florestal, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

- Carvalho, J. P. (2003). Uso da Propriedade da Aditividade de Componentes de Biomassa Individual de *Quercus pyrenaica* Willd. com Recurso a um Sistema de Equações Não-Linear. *Silva Lusitana* 11(2): 141-152.
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., Bailey, R. L. (1983). *Timber management: a quantitative approach*. Florida: Krieger Publishing Company.
- Cortiçada, A., Tomé, M., Tomé, J., Faias, S. P., (2005). O Efeito da rega e fertilização na alometria das árvores. In: Páscoa, F., Silva, R. [eds]. "A Floresta e as Gentes", 5º Congresso Florestal Nacional, Viseu, 16 - 19 de Maio (CD).
- Crow, T.R. (1971). Estimation of biomass in an even-aged: regression and "mean tree" techniques. In: Young, H.E. [ed.], *Forest biomass studies*. IUFRO Yield and Growth Working Group on forest biomass studies. 25th IUFRO Congress: 35-47.
- DGFSA (1966a). *Inventário Florestal ao Norte do Tejo*. DGFSA, Lisboa.
- DGFSA (1966b). *Inventário Florestal ao Sul do Tejo*. DGFSA, Lisboa.
- Falcão, A. (1998) *Estruturação e implementação de uma base de dados de informação biométrica florestal*. Lisboa. Dissertação para obtenção do grau de Mestre. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Fang, J.Y., Chen, A.P., Peng, C.H., Zhao, S.Q., Ci, L.J. (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science* 292: 2320–2322.
- Gorbatenko, V.M. (1970). *Biological productivity of the pine phytocoenoses related to climatic conditions in their growth regions*. PhD Dissertation. Institute of Forest and Wood. Siberian Branch. USSR Academy of Sciences. Krasnoyarsk. (In Russian.)
- Grierson P.F., Adams M.A., Attiwill P.M. (1992). Estimates of Carbon Storage in the Aboveground Biomass of Victorias Forests. *Australian Journal of Botany* 40: 631–640.
- Kuzikov, I.E. (1979). *Changing phytomass in the green moss fir forests of in different climatic conditions of Middle Siberia*. PhD Dissertation. Institute for Forest Research. Krasnoyarsk. (in Russian).

- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*. 27: 1297-1328.
- Madgwick, H.A.I., Satoo, T. (1975). On estimating the aboveground weights of tree stands. *Ecology* 56: 1446-1450.
- Monserud, R.A., Onuchin, A.A., Tchebakova, N.M. (1996). Needle, crown, stem, and root phytomass of *Pinus sylvestris* stands in Russia. *Forest Ecology and Management*, 82 (1-3): 59-67.
- Myers, R.H. (1986). *Classical and Modern Regression with Applications*. Duxbury Press, Boston, Massachusetts, EUA.
- Oliveira, T.S., Aires, N. (2005a). Descrição das bases de dados da Celbi. Publicações Técnicas do GIMREF, nº3/2005, Instituto Superior de Agronomia, Departamento de Engenharia Florestal, Lisboa.
- Oliveira, T.S., Aires, N. (2005b). Descrição da base de dados da Silvicaima. Publicações Técnicas do GIMREF, nº4/2005, Instituto Superior de Agronomia, Departamento de Engenharia Florestal, Lisboa
- Parresol, B. R. (1999). Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and Critical Comparisons. *Forest Science* 45(4): 573-593.
- Parresol, B. R. (2001). Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31 (5): 865-878.
- Pereira, J. S., Linder, S., Araújo, M. C., Pereira, H., Ericsson, T., Borralho, N. , Leal, L. C. (1989). Optimization of biomass production in *Eucalyptus globulus* plantation. A case study. In: Pereira J. S., Landsberg J. J. [eds]. *Biomass Production by Fast-Growing Trees*: 101-121. The Netherlands: Kluwer.
- Radich, M.C. (2007). Introdução e expansão do eucalipto em Portugal. In: Silva, J.S. [Coord. Ed.]. *Pinhais e eucaliptais - A floresta cultivada. Colecção Árvores e Florestas de Portugal* 4: 151-165. Jornal Público/ Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento/ Liga para a Protecção da Natureza. Lisboa.



- Ribeiro, F., Tomé, R. (2000). Classificação Climática de Portugal Continental, baseada em informação do Atlas do Ambiente. Revista Ciências Agrárias Vol. XXIII, nº 2.
- SAS Institute Inc. (2004). SAS/ETS User's guide, version 9.1. SAS Institute Inc., Cary, N.C.
- SAS Institute Inc. (1999). SAS/STAT User's Guide, version 8. SAS Institute Inc. , Cary, N.C.
- Semechkina, M.G. (1978). Structure of the Scotch pine stand's phytomass. Novosibirsk: Nauka. (in Russian).
- Schroeder, P., Brown, S., Mo, J., Birdsey, R., Cieszewski, C. (1997). Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data. Forest Science 43: 424-434.
- Snowdon, P., Eamus, D., Gibbons, P., Khanna, P., Keith, H., Raison, J., Kirschbaum, M. (2000). Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies. In: The Australian Greenhouse Office, Canberra, National Carbon Accounting System Technical Report 17:22-29.
- Soares, P., Tomé, M. (2002). Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. Forest Ecology and Management 166(1-3): 99-109.
- Soares, P., Tomé, M. (2001). A tree crown ratio prediction equation for eucalypt plantations. Annals of Forest Science 58(2): 193-202.
- Tomé, M. (1988). Modelação do Crescimento da Árvore Individual em Povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill (1ª Rotação). Região Centro de Portugal. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Tomé, M., Barreiro, S., Cortiçada, A., Paulo, J.A., Meyer, A., Ramos, T.(2007). Inventário florestal 2005-2006. Áreas, volumes e biomassas dos povoamentos florestais. Resultados Nacionais e por NUT's II e III. Relatórios Técnicos do GIMREF nº 5/2007. Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.

Tomé, M., Ribeiro, F., Soares, P. (2001). O modelo GLOBULUS 2.1. Relatórios Técnico-Científicos do GIMREF nº 1/2001. Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.

Tomé, M., Oliveira, T.S., Soares, P. (2006). O modelo GLOBULUS 3.0. Dados e equações. Publicações GIMREF - RC2/2006. Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.

Usol'tsev, V.A. (1988). Growth and Phytomass Structure of Stands. Novosibirsk: Nauka. (in Russian).

# ANEXOS

## Índice de anexos

ANEXO 1 : Caracterização dos dados dos conjuntos de ajustamento e de validação por região climática e regime de exploração.....	A1
ANEXO 2 : Gráficos da relação entre as diferentes componentes de biomassa com a altura dominante e a área basal dos conjuntos de ajustamento e validação .....	A4
ANEXO 3 : Gráficos dos resíduos <i>studentizados</i> em papel de probabilidade normal ( <i>Normal QQ plot</i> ) das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade.....	A9
ANEXO 4 : Gráficos dos resíduos <i>studentizados</i> em função dos valores preditos das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade.....	A13
ANEXO 5 : Gráficos dos resíduos em função dos resíduos anteriores de ordem 1, 2 e 3. ....	A17
ANEXO 6 : Diagnósticos de colinearidade das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade .....	A22
ANEXO 7 : Gráficos dos resíduos <i>studentizados</i> em papel de probabilidade normal ( <i>Normal QQ plot</i> ) das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade após ajustamento simultâneo .....	A27
ANEXO 8 : Gráficos dos resíduos <i>studentizados</i> em função dos valores preditos das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade após ajustamento simultâneo .....	A31
ANEXO 9 : Gráficos de extremos e quartis ( <i>box-plot</i> ) dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade .....	A35

**ANEXO 1 : Caracterização dos dados dos conjuntos de ajustamento e de validação  
por região climática e regime de exploração**

**Tabela 15** – Caracterização dos dados de 1ª rotação do conjunto de ajustamento por região climática

		Região climática							
		1NL	2NC	3CL	4SL	5VT	6NI	7SI	8VD
Observações		126	754	2166	724	1923	459	410	2
t	Min	2,6	0,6	0,9	4,0	0,7	4,0	4,0	7,0
	Média	6,9	8,9	9,4	8,4	8,6	8,9	8,9	7,5
	Max	13,3	19,4	33,9	14,6	20,3	11,9	13,5	8,0
S	Min	13,8	8,6	6,5	8,7	8,0	5,8	8,9	17,9
	Média	25,4	21,0	20,5	19,4	19,3	16,3	18,2	18,3
	Max	30,0	32,4	33,9	28,3	30,2	26,0	25,3	18,6
hdom	Min	7,6	3,3	2,8	8,8	2,1	4,0	4,9	14,9
	Média	20,0	19,1	18,7	17,4	17,0	15,0	16,9	15,8
	Max	33,2	32,8	36,6	27,9	32,2	26,7	27,4	16,7
N	Min	879	357	250	375	269	425	267	775
	Média	1981	1309	1295	998	1045	1058	937	800
	Max	4617	3125	5000	1850	2600	1875	1700	825
G	Min	5,8	0,5	0,1	2,4	0,1	0,4	0,7	16,9
	Média	21,3	15,4	16,3	13,4	11,8	11,0	10,8	18,6
	Max	38,8	34,0	64,6	31,0	34,3	36,6	27,7	20,4

**Tabela 16** – Caracterização dos dados de talhadia do conjunto de ajustamento por região climática

		Região climática							
		1NL	2NC	3CL	4SL	5VT	6NI	7SI	8VD
Observações		-	231	1734	1073	2157	540	302	2
t	Min		1,2	1,1	3,8	2,2	4,1	7,0	9,0
	Média		6,8	7,6	9,2	7,7	8,7	9,7	9,0
	Max		12,0	21,3	14,0	20,7	11,0	12,0	9,0
S	Min		14,6	11,8	9,5	6,8	10,3	7,1	16,0
	Média		21,1	20,5	18,1	18,6	17,4	15,6	17,2
	Max		32,1	30,8	30,4	33,7	23,9	25,2	18,3
hdom	Min		7,6	4,2	8,5	5,6	7,1	6,2	15,5
	Média		16,7	17,5	17,3	16,3	16,1	15,5	16,6
	Max		33,8	36,8	31,0	31,7	23,0	25,2	17,8
N	Min		433	267	200	200	200	225	1500
	Média		1736	1532	1287	1252	1366	938	1513
	Max		4600	8563	2700	2575	4033	1925	1525
G	Min		1,7	0,8	1,4	0,6	1,3	0,5	12,4
	Média		13,3	13,1	12,0	10,7	10,5	8,0	12,5
	Max		35,8	39,7	32,5	37,4	23,4	18,1	12,6

**Tabela 17** – Caracterização dos dados de 1ª rotação do conjunto de validação por região climática

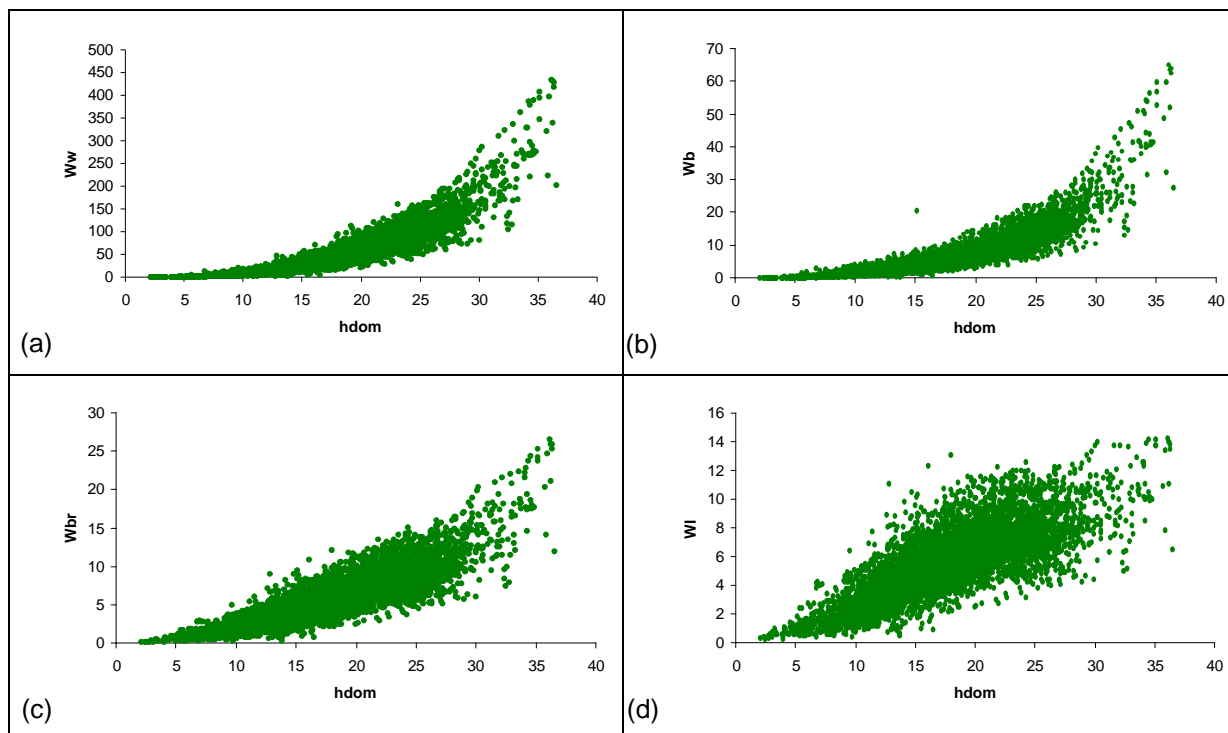
		Região climática				
		3CL	4SL	5VT	6NI	7SI
Observações		462	240	3109	6	155
t	Min	4,4	6,0	4,1	11,2	8,4
	Média	9,7	9,3	8,5	11,2	9,9
	Max	17,3	12,0	16,1	11,2	12,0
S	Min	8,8	16,0	7,4	12,2	10,0
	Média	19,9	19,6	18,4	13,9	14,7
	Max	24,0	23,7	26,3	15,9	19,1
hdom	Min	7,3	13,3	5,9	13,3	9,2
	Média	19,4	18,9	16,4	15,0	14,6
	Max	27,6	24,6	25,6	17,0	19,7
N	Min	100	308	175	450	290
	Média	908	877	900	800	680
	Max	1650	1108	1666	1100	1100
G	Min	0,4	4,8	0,7	6,9	2,1
	Média	14,5	13,4	10,7	8,9	7,4
	Max	29,5	24,0	31,9	11,3	16,4

**Tabela 18** – Caracterização dos dados de talhadia do conjunto de validação por região climática

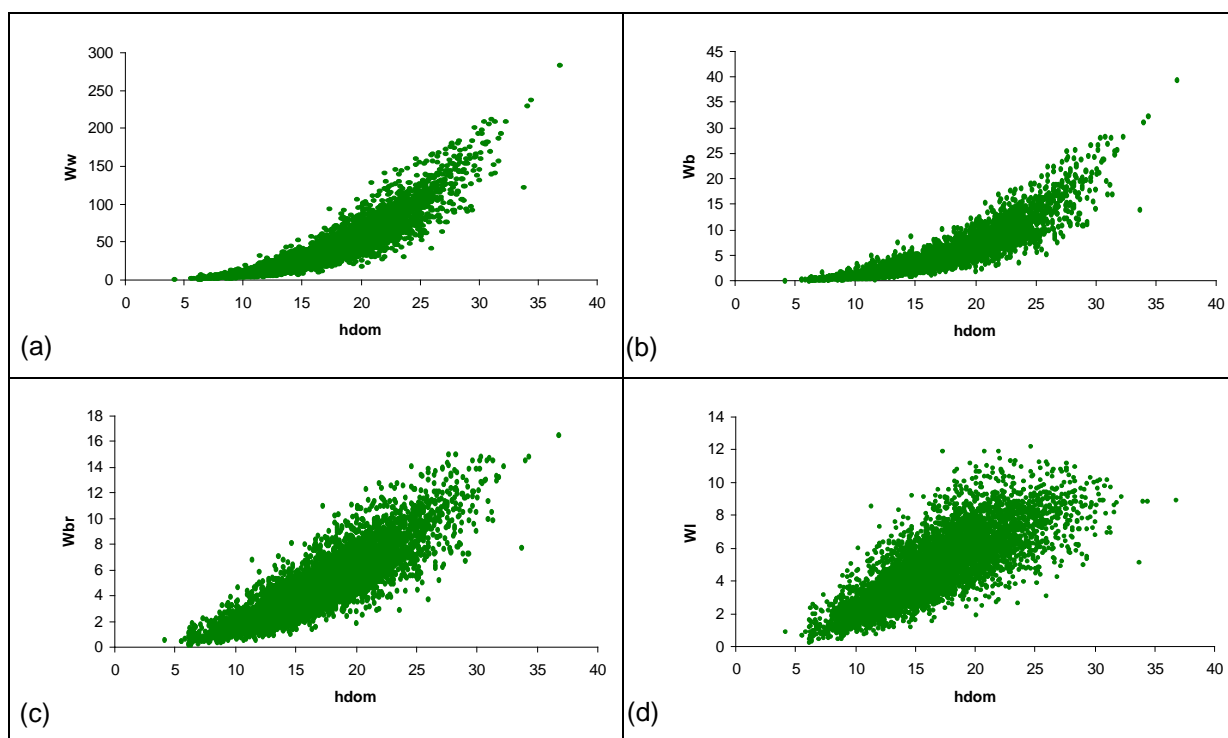
		Região climática				
		3CL	4SL	5VT	6NI	7SI
Observações		673	371	2526		81
t	Min	4,1	9,0	3,1		9,0
	Média	6,9	10,2	7,1		10,3
	Max	11,4	12,0	11,5		12,0
S	Min	16,0	10,0	9,8		9,4
	Média	20,6	16,6	18,4		13,5
	Max	24,0	23,9	24,0		16,0
hdom	Min	9,9	9,7	7,0		9,8
	Média	17,0	16,7	15,7		13,7
	Max	23,8	24,5	24,7		16,0
N	Min	300	600	200		275
	Média	1097	1305	1095		873
	Max	1667	1650	2267		1100
G	Min	2,3	3,3	0,8		2,7
	Média	10,5	11,8	9,4		6,9
	Max	24,9	21,3	26,3		12,1

**ANEXO 2 : Gráficos da relação entre as diferentes componentes de biomassa com a altura dominante e a área basal dos conjuntos de ajustamento e validação**

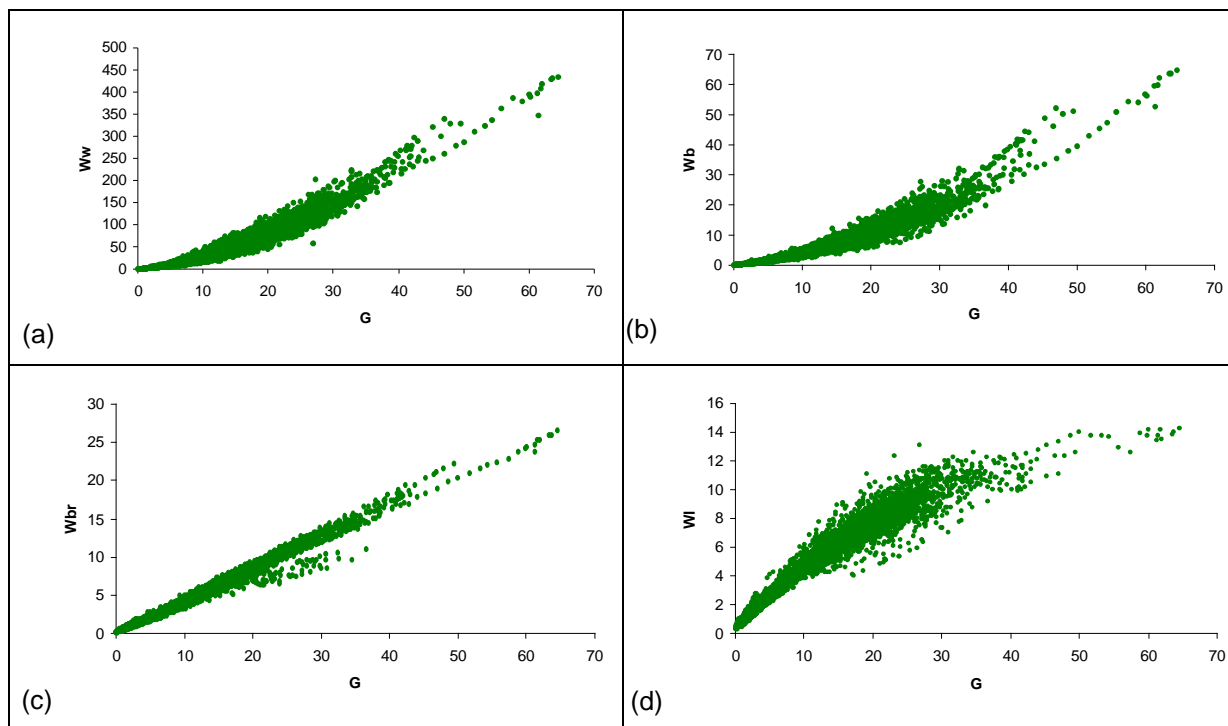




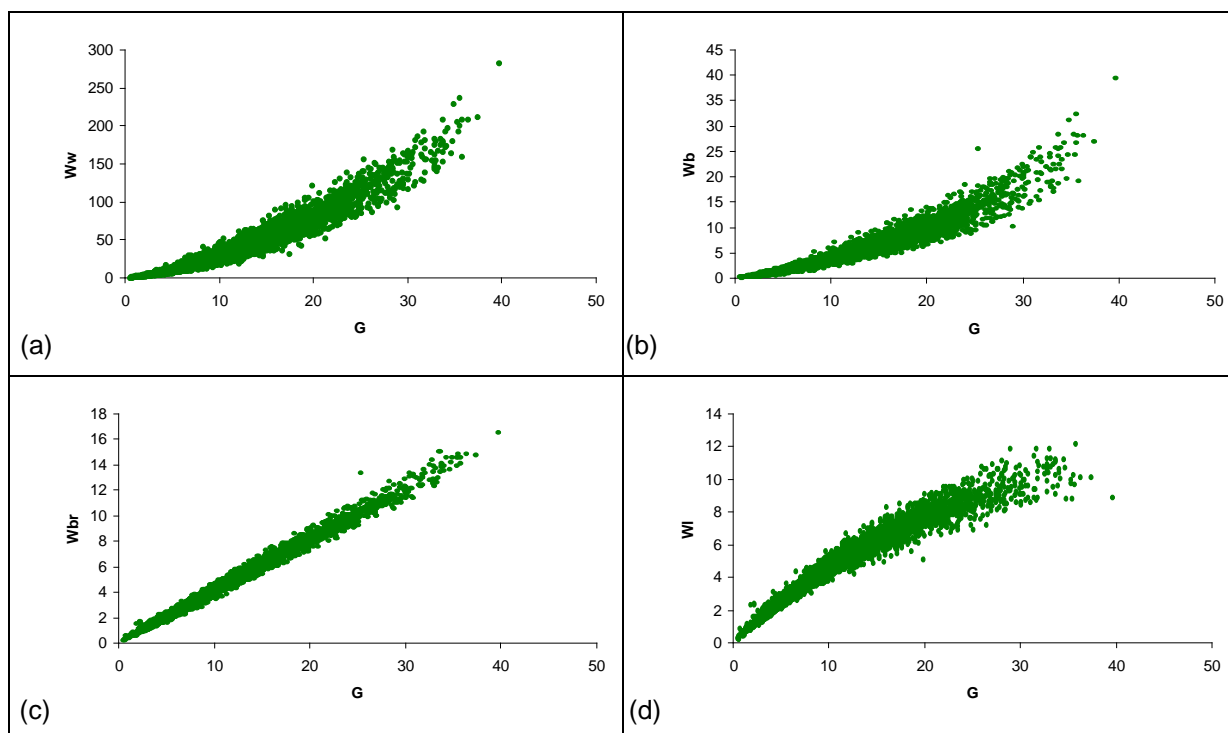
**Figura 1** – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) (Mg ha<sup>-1</sup>) em função da hdom (m) no conjunto de dados de ajustamento em 1ª rotação



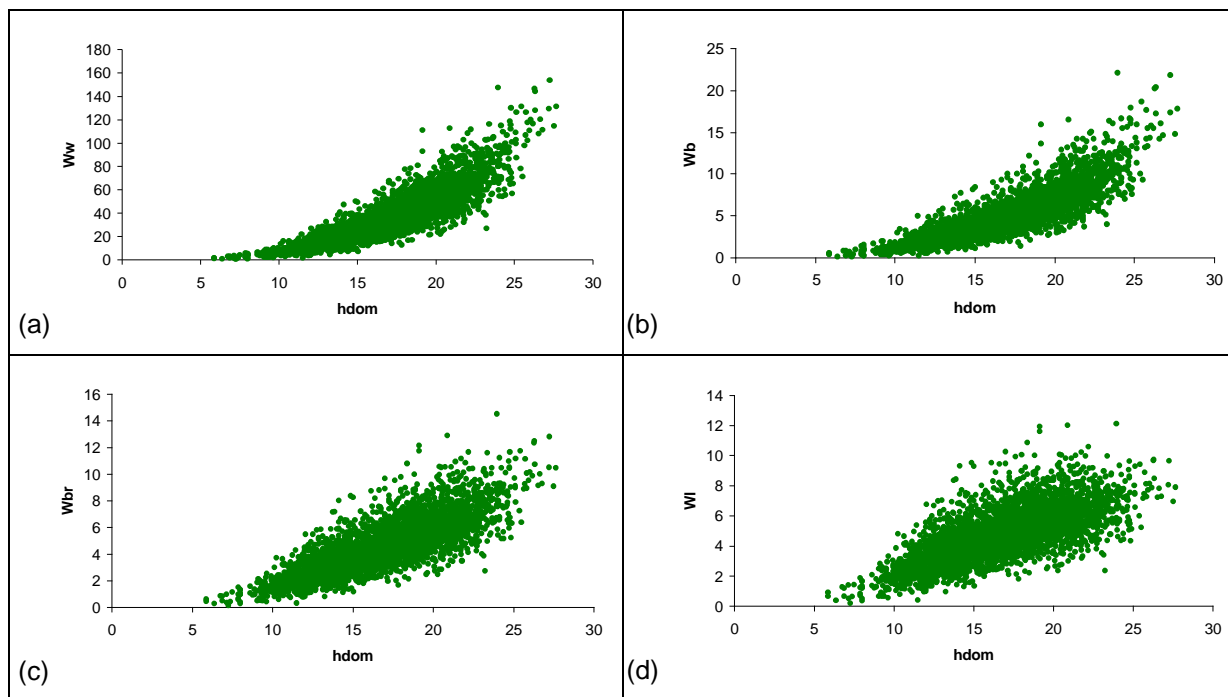
**Figura 2** – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) (Mg ha<sup>-1</sup>) em função da hdom (m) no conjunto de dados de ajustamento em talhadia



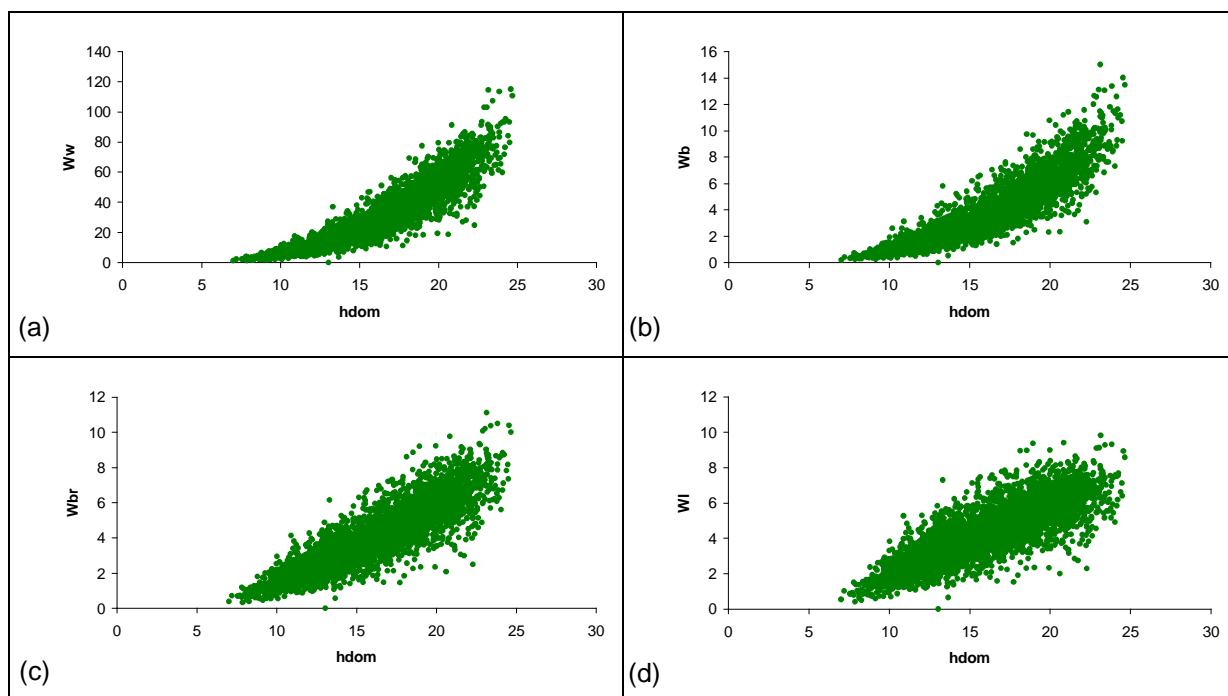
**Figura 3** – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da  $G$  ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) no conjunto de dados de ajustamento em 1ª rotação



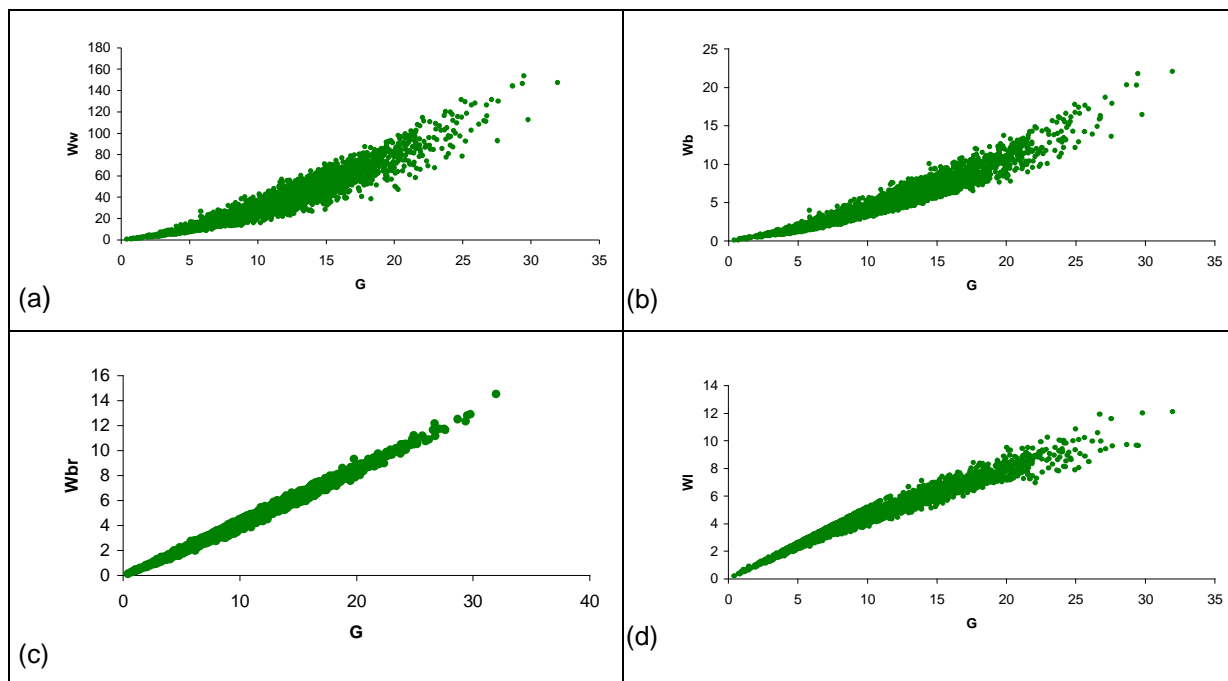
**Figura 4** – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da  $G$  ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) no conjunto de dados de ajustamento em talhadia



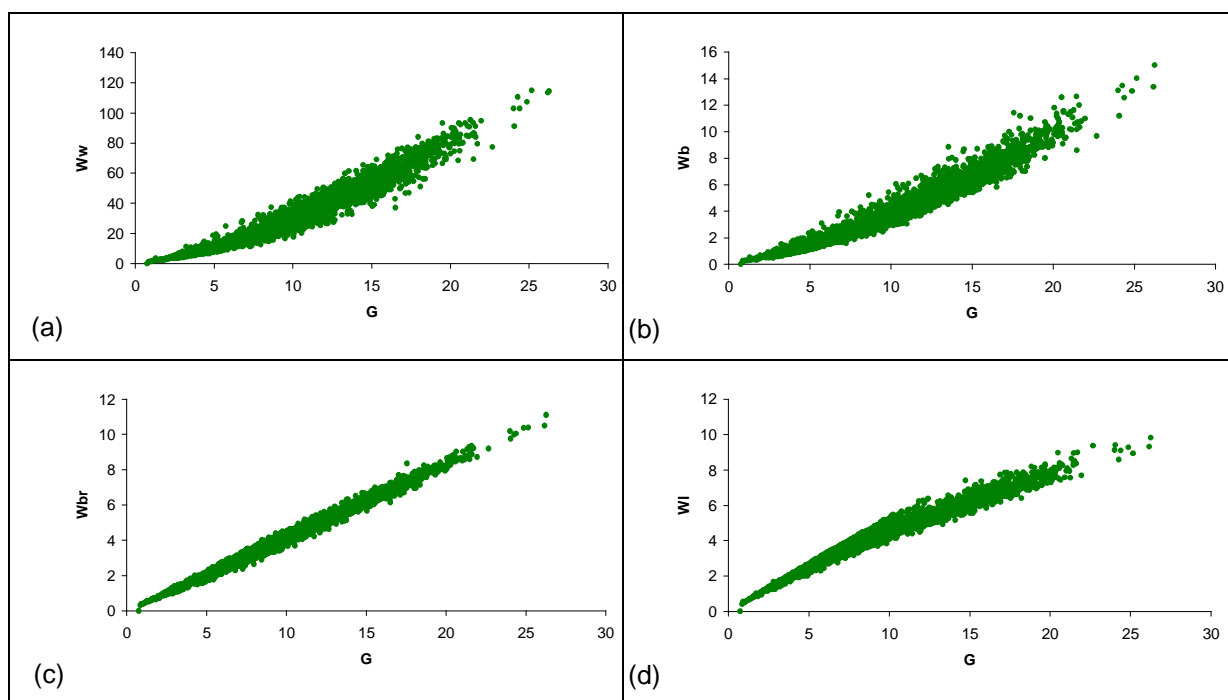
**Figura 5** – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) (Mg ha<sup>-1</sup>) em função da hdom (m) no conjunto de dados de validação em 1ª rotação



**Figura 6** – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) (Mg ha<sup>-1</sup>) em função da hdom (m) no conjunto de dados de validação em talhadia

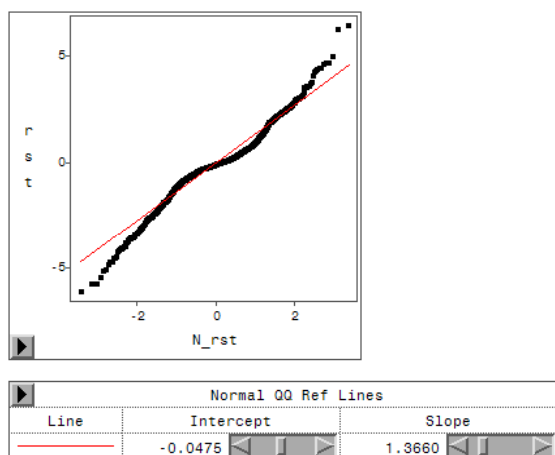


**Figura 7** – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da  $G$  ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) no conjunto de dados de validação em 1ª rotação

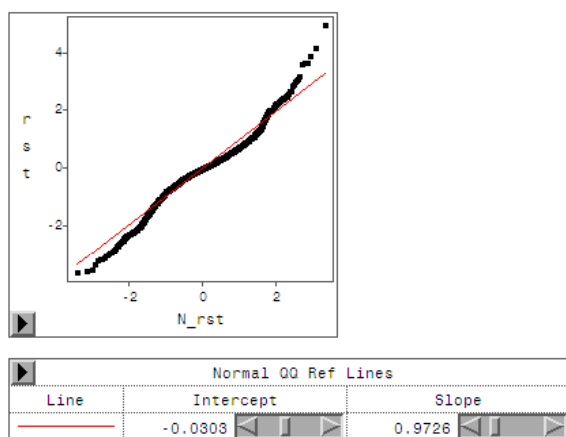


**Figura 8** – Biomassa de lenho (a), de casca (b), de ramos (c) e de folhas (d) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em função da  $G$  ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) no conjunto de dados de validação em talhadia

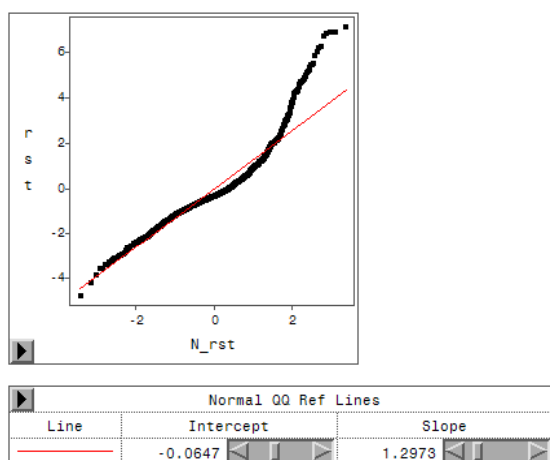
**ANEXO 3 : Gráficos dos resíduos *studentizados* em papel de probabilidade normal (*Normal QQ plot*) das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade**



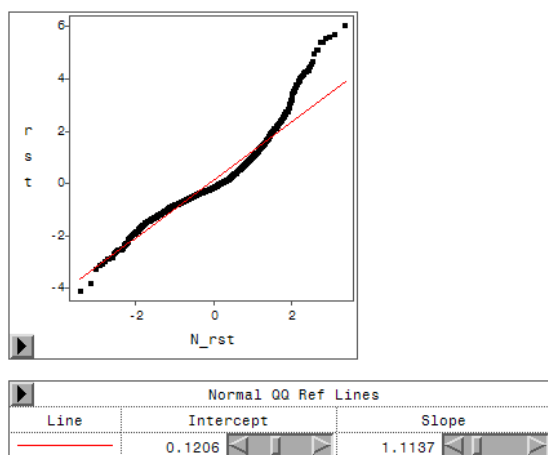
**Figura 9** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* da biomassa de lenho com idade



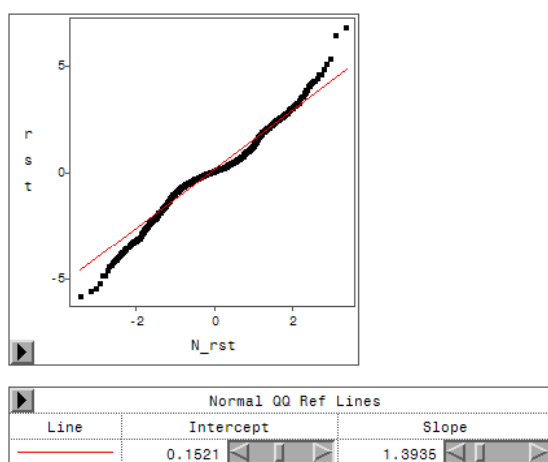
**Figura 10** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de casca com idade



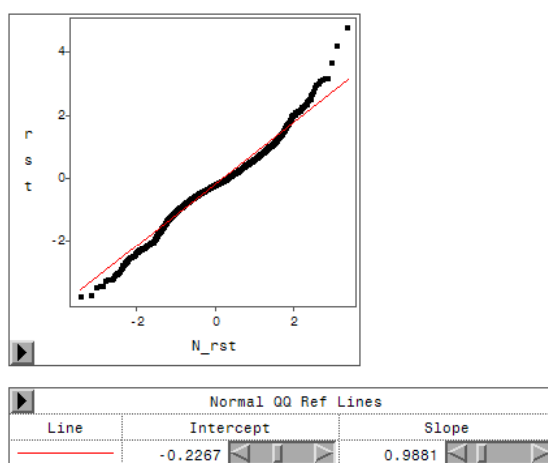
**Figura 11** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de ramos com idade



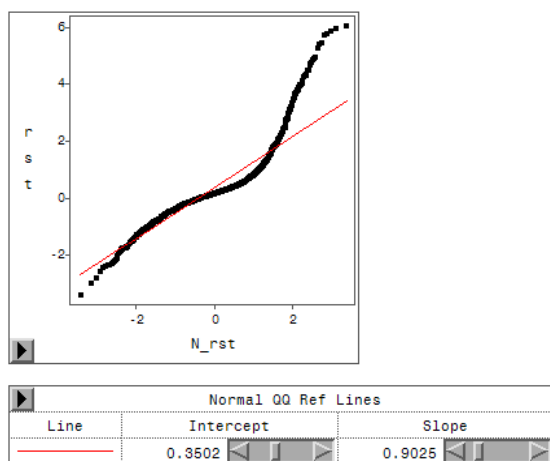
**Figura 12** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de folhas com idade



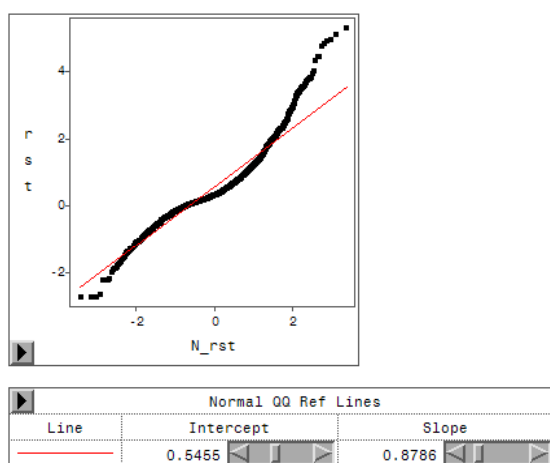
**Figura 13** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de lenho sem idade



**Figura 14** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de casca sem idade



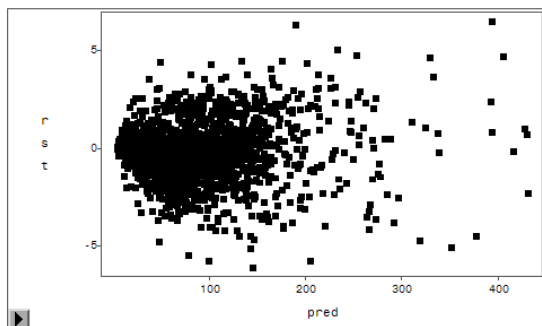
**Figura 15** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de ramos sem idade



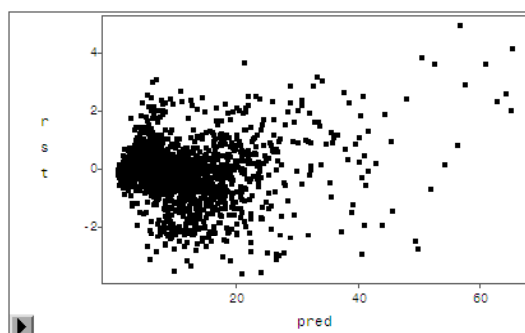
**Figura 16** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de folhas sem idade



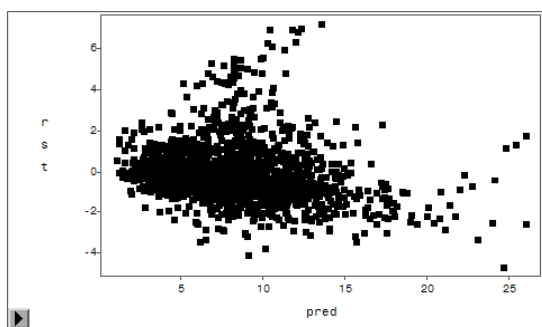
**ANEXO 4 : Gráficos dos resíduos *studentizados* em função dos valores preditos das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade**



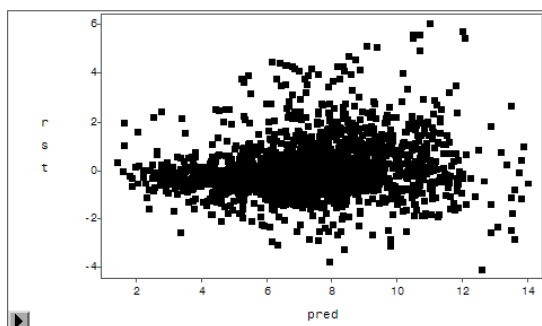
**Figura 17** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de lenho com idade



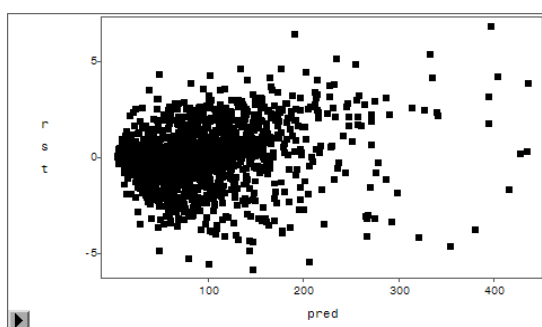
**Figura 18** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de casca com idade



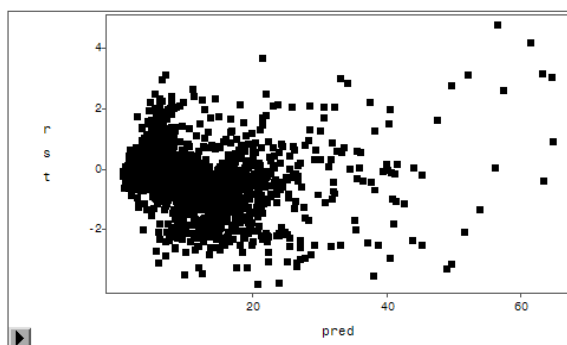
**Figura 19** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de ramos com idade



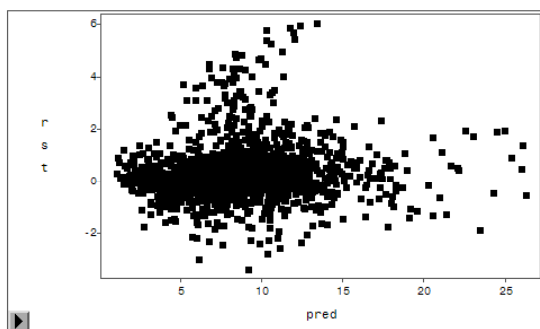
**Figura 20** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de folhas com idade



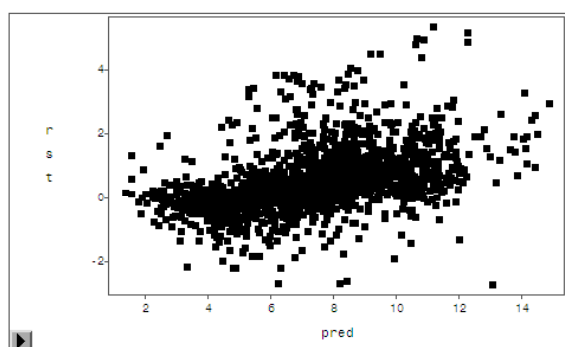
**Figura 21** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de lenho sem idade



**Figura 22** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de casca sem idade

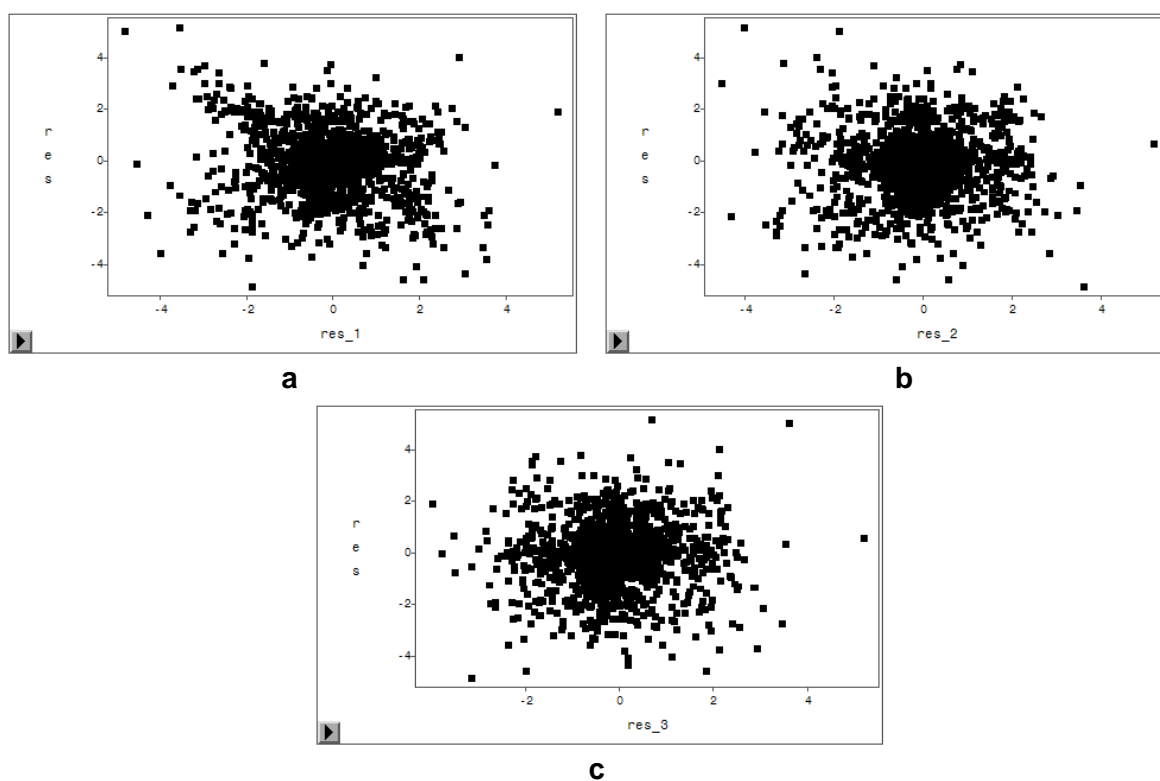


**Figura 23** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de ramos sem idade

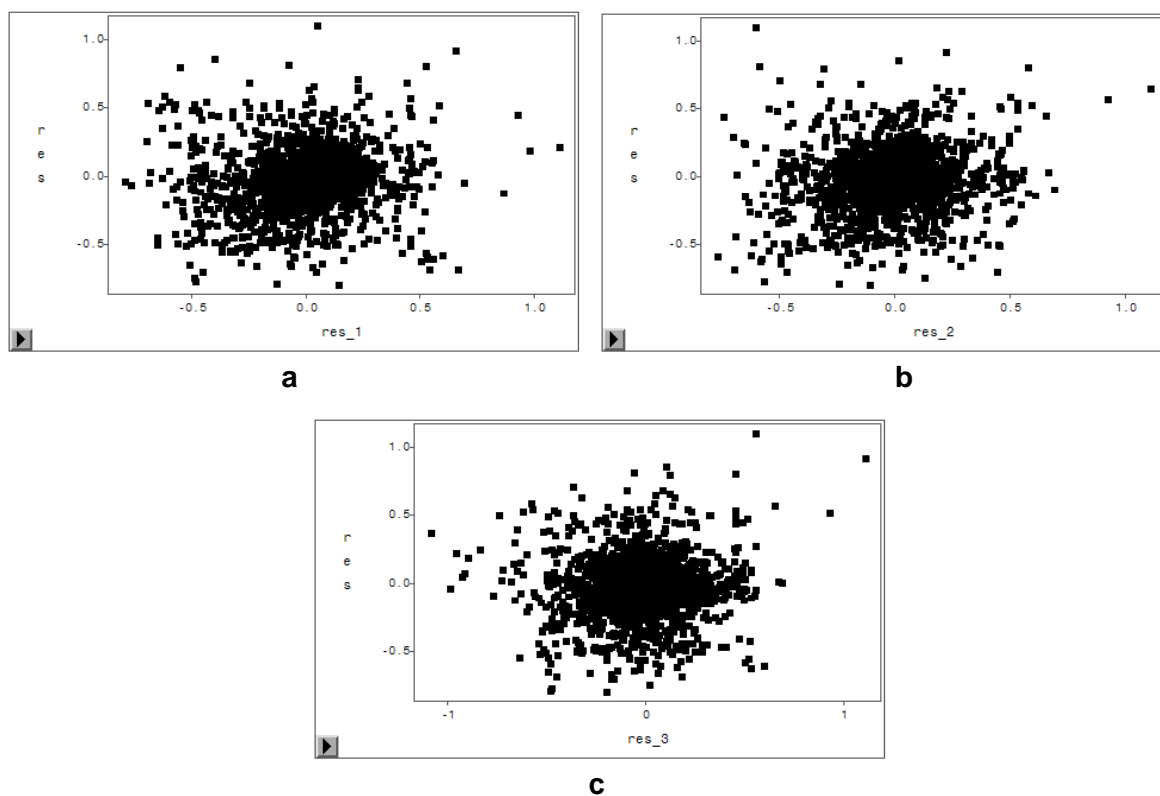


**Figura 24** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de folhas sem idade

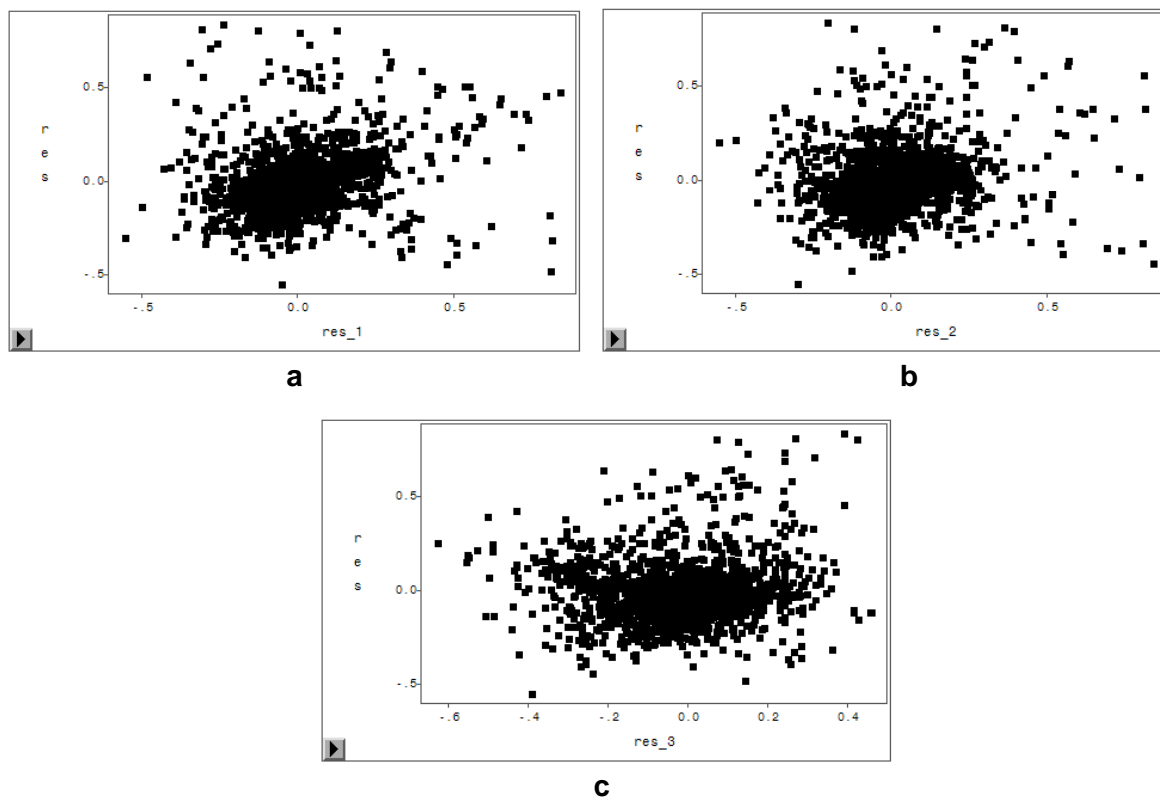
**ANEXO 5 : Gráficos dos resíduos em função dos resíduos anteriores de ordem 1, 2 e 3.**



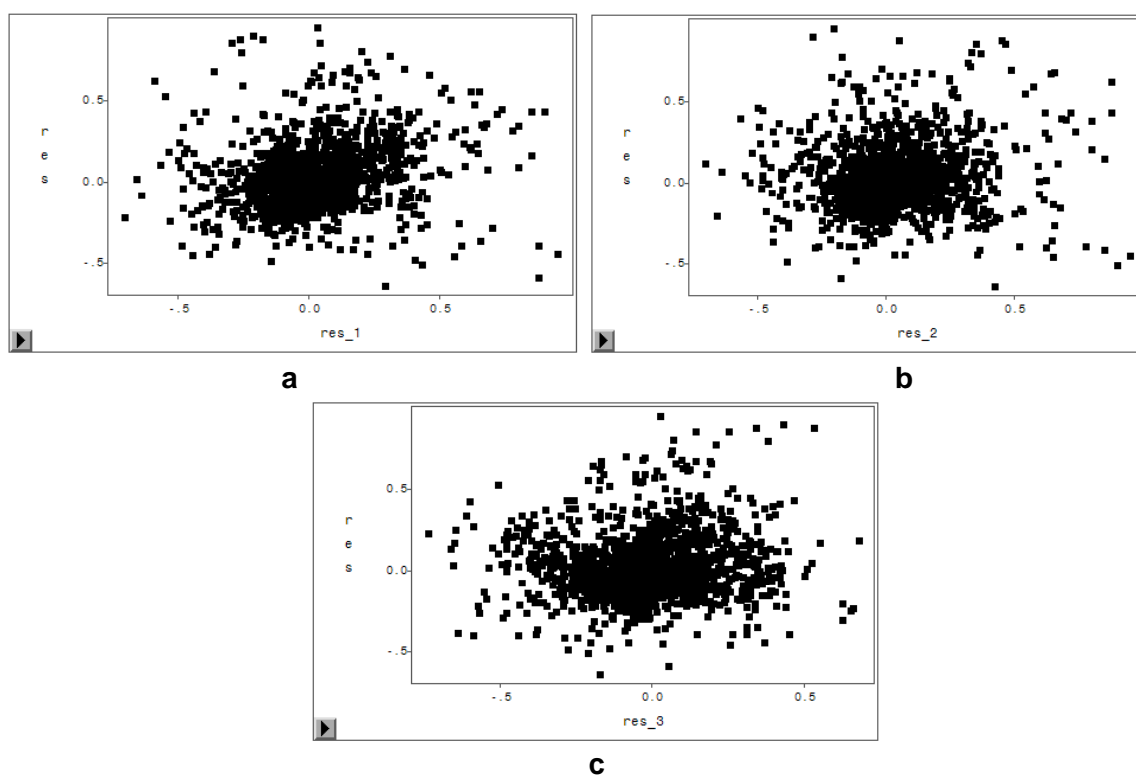
**Figura 25** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de lenho com idade



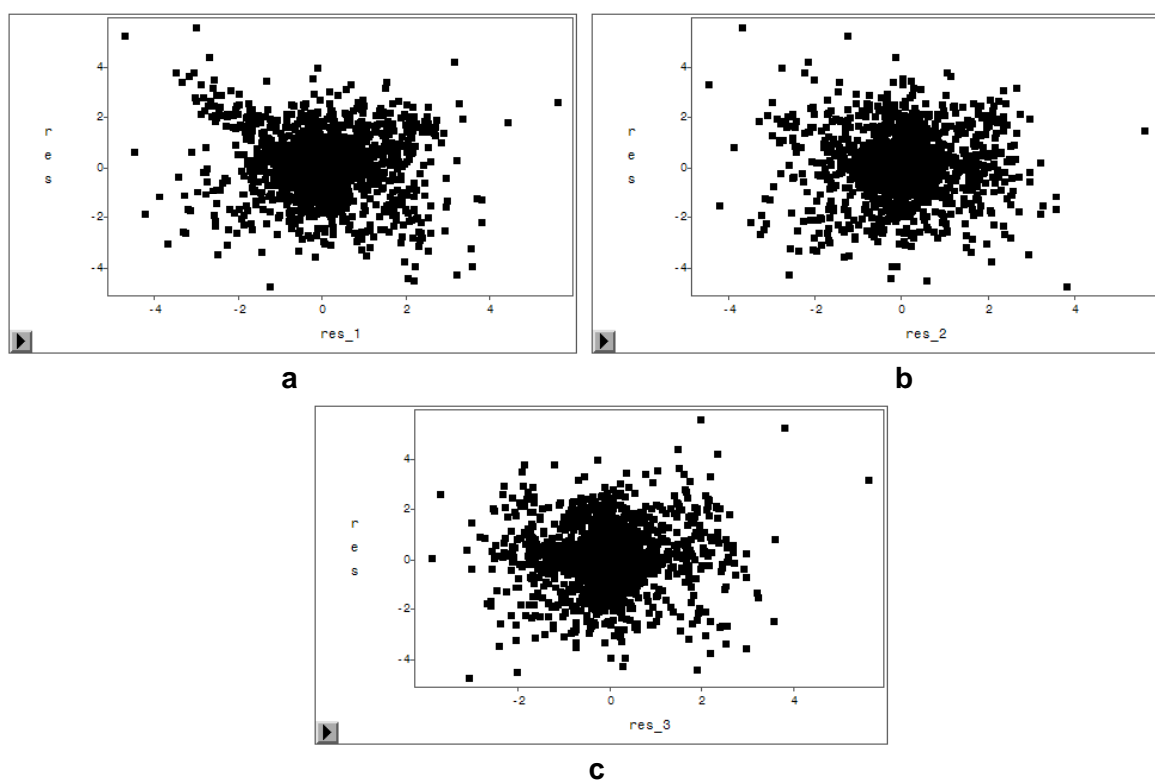
**Figura 26** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de casca com idade



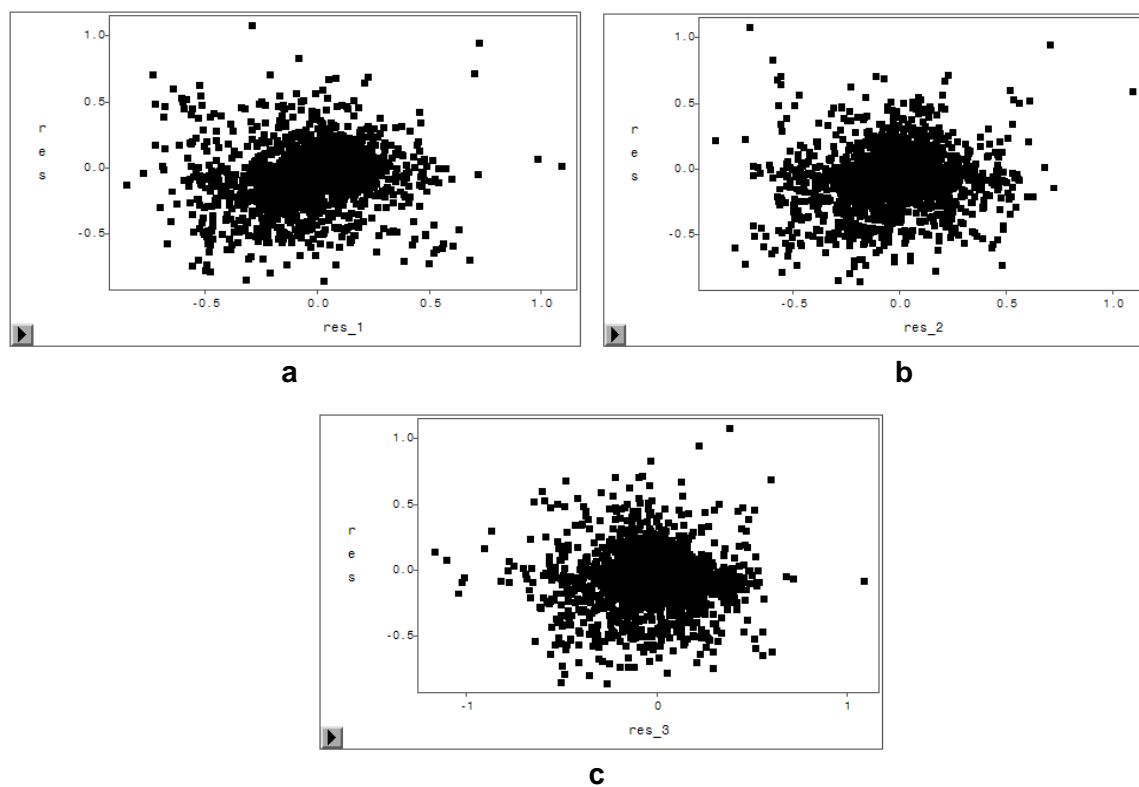
**Figura 27** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de ramos com idade



**Figura 28** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de folhas com idade

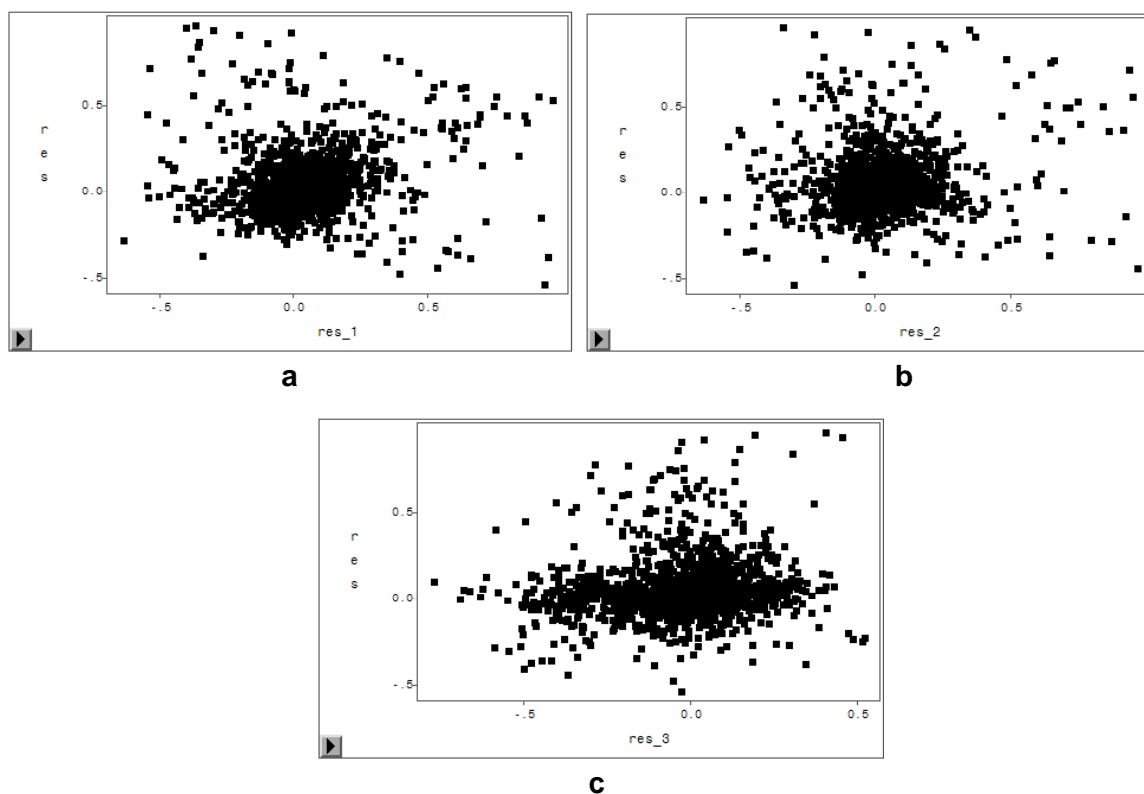


**Figura 29** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de lenho sem idade

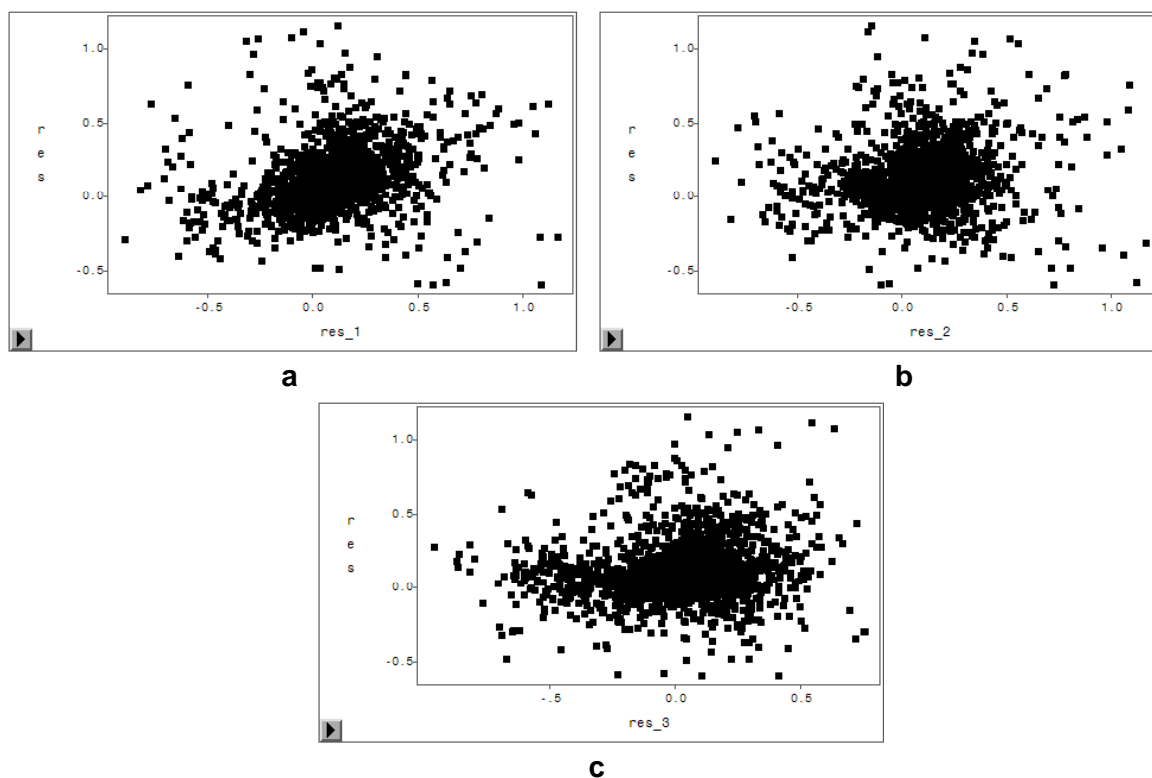


**Figura 30** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de casca sem idade





**Figura 31** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de ramos sem idade



**Figura 32** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e os resíduos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do modelo da biomassa de folhas sem idade

**ANEXO 6 : Diagnósticos de colinearidade das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade**

**Tabela 19** – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de lenho com idade

Number	Eigen-value	Condition Number	-----Proportion of Variation-----									
			aw0	bw0	bw1	bw2	bw3	cw0	ar1	ma1	ar2	ma2
1	5,268512	1	0,0001	0,0001	0,0022	0,0027	0,0096	0,0001	0	0	0	0
2	1,976462	1,6327	0	0	0	0	0,0004	0	0,0115	0,0021	0,0216	0,0579
3	1,672656	1,7748	0	0	0	0	0	0	0,0089	0,0291	0,0062	0,0481
4	0,531191	3,1493	0,0001	0,0002	0,0065	0	0,8264	0,0001	0	0,0001	0	0,0029
5	0,319524	4,0606	0	0	0,0008	0	0,0046	0	0,0102	0,0354	0,1012	0,7355
6	0,104132	7,113	0,0015	0,0002	0,0512	0,6329	0,097	0,0008	0,0001	0,0002	0	0,0001
7	0,090513	7,6294	0,0082	0,0008	0,4968	0,0056	0,0123	0,0018	0,0032	0,0041	0,0014	0,0116
8	0,031835	12,8644	0,0001	0	0,0053	0,0002	0,0002	0	0,9661	0,929	0,8682	0,1418
9	0,004025	36,1779	0,3233	0,5509	0,4205	0,1998	0,0258	0,0007	0,0001	0	0,0013	0,0021
10	0,00115	67,6975	0,6667	0,4477	0,0169	0,1588	0,0236	0,9966	0	0,0001	0,0001	0,0001

**Tabela 20** – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de casca com idade

Number	Eigenvalue	Condition Number	-----Proportion of Variation-----						
			ab0	bb0	bb1	bb2	cb0	cb1	ar1
1	5,289289	1	0,0001	0,0002	0,0092	0,0021	0,0001	0,0021	0,0001
2	1,003576	2,2957	0	0	0,0028	0,0003	0	0	0,9399
3	0,54681	3,1101	0,0002	0,0002	0,8038	0,0053	0,0001	0	0,0099
4	0,098436	7,3303	0,003	0,0002	0,0618	0,4766	0,0005	0,1095	0,0402
5	0,05594	9,7239	0,0129	0,0017	0,0722	0,0486	0,0048	0,6891	0,006
6	0,004504	34,2681	0,256	0,707	0,0377	0,4268	0,0006	0,1505	0,0038
7	0,001445	60,4991	0,7279	0,2907	0,0126	0,0405	0,994	0,0488	0

**Tabela 21** – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de ramos com idade

Number	Eigen-value	Condition Number	-----Proportion of Variation-----									
			abr0	abr1	bbr0	bbr1	bbr2	cbr0	ar1	ma1	ar2	ma2
1	5,330314	1	0,0001	0,002	0,0002	0,0025	0,0093	0,0001	0	0	0	0
2	2,317363	1,5166	0	0	0	0	0	0	0,004	0,0064	0,0038	0,062
3	1,014793	2,2919	0	0	0	0	0,0004	0	0,0007	0,0858	0,0068	0,0828
4	0,655705	2,8512	0	0	0	0	0,0005	0	0,0025	0,0468	0,0003	0,8429
5	0,504012	3,252	0,0002	0,005	0,0003	0	0,8125	0,0001	0	0,0004	0	0,0004
6	0,108629	7,0049	0,0016	0,0783	0	0,5431	0,1041	0,0005	0,0001	0	0	0,0009
7	0,049056	10,4239	0,0123	0,8077	0,004	0,0502	0,0001	0,0061	0,0006	0,0008	0	0,0005
8	0,011806	21,2483	0	0,0062	0	0,0006	0,0004	0	0,9922	0,8597	0,989	0,0103
9	0,007026	27,5431	0,2238	0,0269	0,4295	0,2573	0,0409	0,0001	0	0	0	0
10	0,001296	64,141	0,7619	0,0739	0,566	0,1463	0,0318	0,9931	0	0,0001	0,0001	0,0001

**Tabela 22** – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de folhas com idade

Number	Eigen- value	Condition Number	-----Proportion of Variation-----								
			al0	bl0	bl1	cl0	cl1	ar1	ma1	ar2	ma2
1	4,799651	1	0,0002	0,0003	0,0039	0,0001	0,0022	0	0	0	0
2	2,562187	1,3687	0	0	0	0	0	0,0071	0,0083	0,0078	0,0578
3	0,890782	2,3212	0	0	0	0	0	0	0,0882	0,0363	0,0019
4	0,516554	3,0482	0	0	0,0001	0	0,0001	0,012	0,0072	0,0142	0,9235
5	0,125686	6,1796	0,0015	0,0002	0,6238	0,0007	0,0519	0	0	0,0004	0,0044
6	0,069811	8,2917	0,0159	0,0005	0,0182	0,0022	0,4813	0,0003	0,0004	0,0005	0,0014
7	0,02659	13,4352	0	0	0	0	0,002	0,9803	0,8947	0,9397	0,0097
8	0,007527	25,2516	0,1352	0,5523	0,2621	0	0,3298	0	0,0003	0,0002	0,0004
9	0,001211	62,9567	0,8471	0,4466	0,0918	0,997	0,1328	0,0002	0,0008	0,0009	0,0008

**Tabela 23** – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de lenho sem idade

Number	Eigen-value	Condition Number	-----Proportion of Variation-----								
			aw0	aw1	bw0	cw0	cw1	ar1	ma1	ar2	ma2
1	4,418912	1	0,0002	0,0142	0,0003	0,0001	0,0038	0	0	0	0
2	2,062077	1,4639	0	0,0003	0	0	0	0,0091	0,0023	0,0123	0,0488
3	1,473283	1,7319	0	0	0	0	0	0,0042	0,0356	0,0034	0,0895
4	0,496484	2,9834	0,0003	0,8326	0,0006	0,0002	0,0011	0	0,0004	0,0001	0,0076
5	0,43816	3,1757	0	0,0088	0	0	0	0,0047	0,0382	0,0345	0,6636
6	0,07952	7,4545	0,0062	0,0585	0,0016	0,0024	0,7587	0,0001	0	0,0001	0,0002
7	0,022699	13,9525	0	0	0	0	0,0001	0,9815	0,9231	0,948	0,1888
8	0,007548	24,1954	0,2621	0,0748	0,3979	0	0,134	0,0002	0,0002	0,0011	0,0014
9	0,001317	57,9195	0,731	0,0109	0,5997	0,9973	0,1024	0,0002	0,0002	0,0003	0

**Tabela 24** – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de casca sem idade

Number	Eigen-value	Condition Number	-----Proportion of Variation-----						
			ab0	bb0	bb1	cb0	cb1	ar1	ma1
1	4,403738	1	0,0002	0,0003	0,0143	0,0001	0,0031	0	0
2	1,46744	1,7323	0	0	0,0001	0	0	0,2648	0,2657
3	0,540028	2,8556	0,0001	0,0002	0,306	0,0001	0,0003	0,4625	0,4423
4	0,520941	2,9075	0,0002	0,0003	0,5322	0,0001	0,0003	0,2671	0,29
5	0,058712	8,6606	0,0086	0,0026	0,0947	0,0037	0,8275	0,0019	0,0001
6	0,007672	23,9586	0,2761	0,4252	0,0342	0,0001	0,0839	0,0037	0,0009
7	0,001469	54,7548	0,7147	0,5714	0,0186	0,9959	0,0848	0	0,001

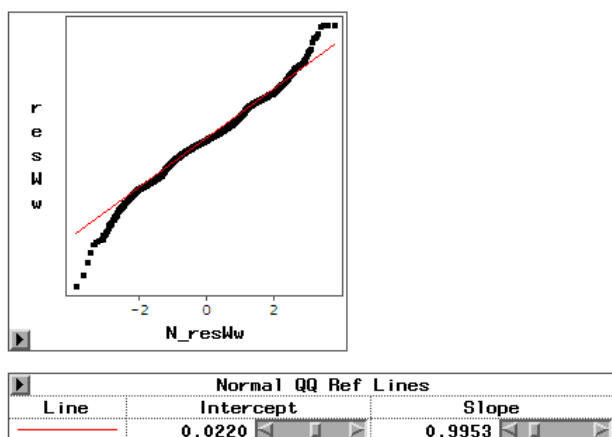
**Tabela 25** – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de ramos sem idade

Number	Eigenvalue	Condition Number	-----Proportion of Variation-----								
			abr0	bbr0	bbr1	bbr2	cbr0	ar1	ma1	ar2	ma2
1	4,423863	1	0,0003	0,0003	0,0039	0,0142	0,0001	0	0	0,0001	0,0002
2	2,522857	1,3242	0	0	0,0001	0,0005	0	0,0053	0,0059	0,0064	0,0574
3	0,939036	2,1705	0	0	0	0,001	0	0,0004	0,0847	0,0144	0,0441
4	0,506272	2,956	0,0001	0,0002	0,0006	0,3169	0,0001	0,0042	0	0,0143	0,549
5	0,468382	3,0733	0,0005	0,0004	0,0001	0,5264	0,0002	0,0029	0,0006	0,0116	0,3344
6	0,108674	6,3803	0,0069	0,0005	0,578	0,0684	0,0019	0,0001	0	0,0007	0,0086
7	0,020136	14,8223	0,0004	0,0002	0	0	0	0,9838	0,9048	0,9453	0,0063
8	0,009333	21,7714	0,2816	0,3037	0,2338	0,0394	0,0011	0,0032	0,004	0,007	0
9	0,001448	55,2766	0,7101	0,6947	0,1835	0,0331	0,9967	0	0	0,0002	0,0001

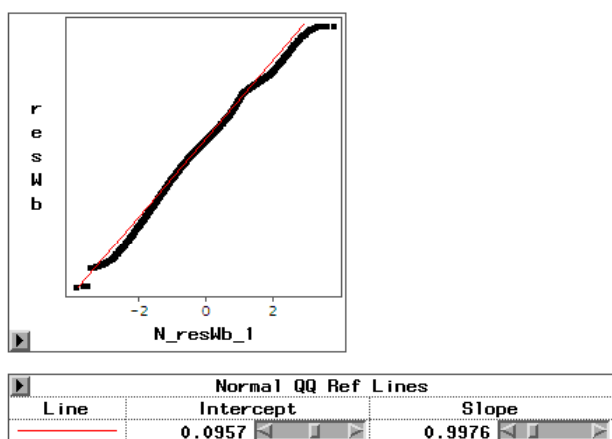
**Tabela 26** – Diagnóstico de colinearidade do modelo para a biomassa de folhas sem idade

Number	Eigenvalue	Condition Number	-----Proportion of Variation-----							
			al0	bl0	bl1	cl0	ar1	ma1	ar2	ma2
1	3,860934	1	0,0004	0,0004	0,0065	0,0002	0	0	0	0
2	2,508671	1,2406	0	0	0	0	0,0035	0,0039	0,0041	0,0588
3	0,948187	2,0179	0	0	0	0	0,0001	0,0634	0,0083	0,0297
4	0,530148	2,6987	0	0	0	0	0,0041	0	0,0125	0,8863
5	0,125436	5,548	0,0069	0,0009	0,634	0,002	0	0	0	0,0001
6	0,012609	17,4984	0,131	0,1917	0,1212	0,0001	0,3492	0,3213	0,3409	0,0092
7	0,012483	17,5869	0,0705	0,1061	0,0812	0,0001	0,6429	0,6114	0,634	0,0158
8	0,001532	50,2058	0,7912	0,7009	0,157	0,9977	0	0	0	0

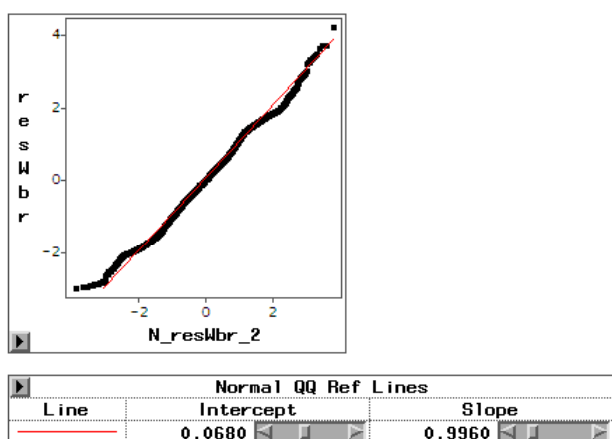
**ANEXO 7 : Gráficos dos resíduos *studentizados* em papel de probabilidade normal (*Normal QQ plot*) das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade após ajustamento simultâneo**



**Figura 33** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de lenho com idade

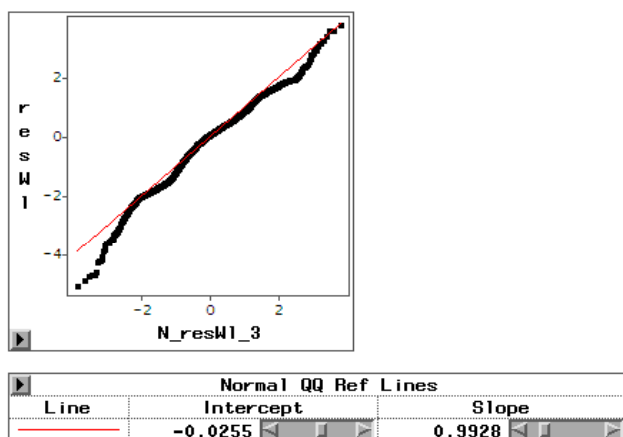


**Figura 34** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de casca com idade

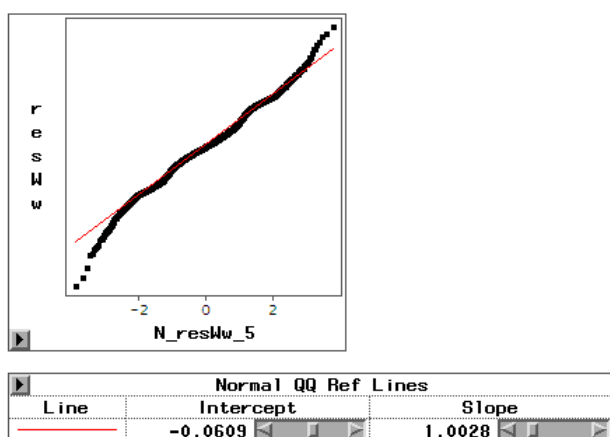


**Figura 35** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de ramos com idade

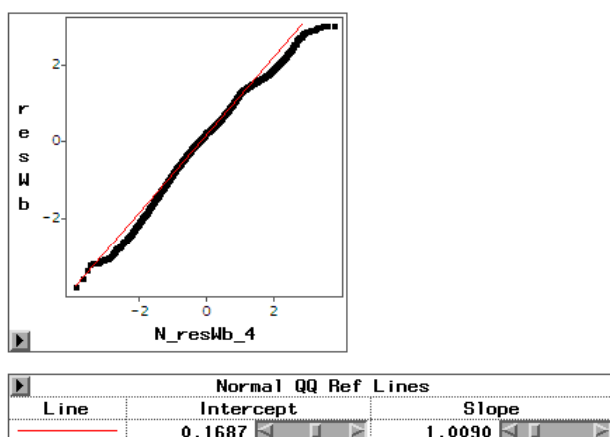




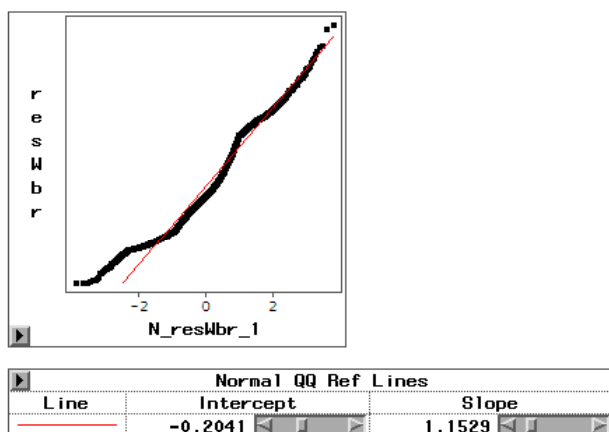
**Figura 36** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de folhas com idade



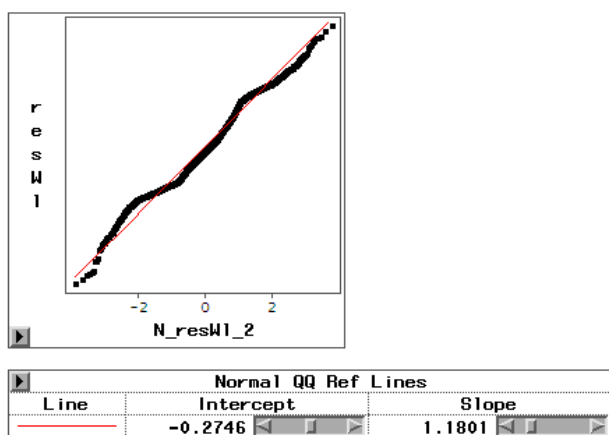
**Figura 37** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de lenho sem idade



**Figura 38** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de casca sem idade

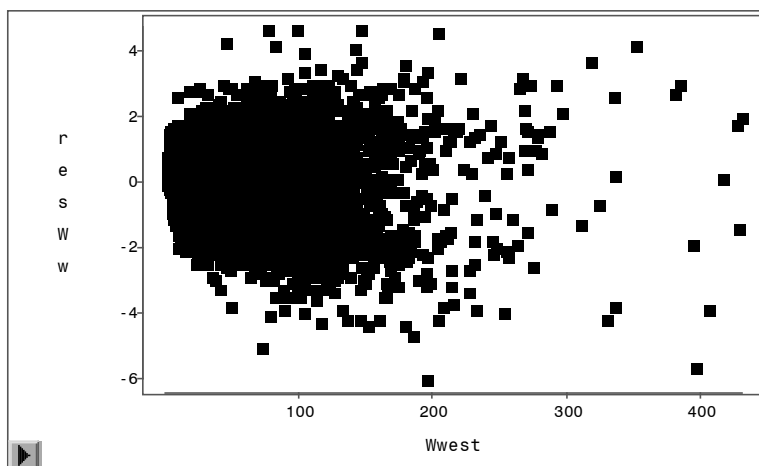


**Figura 39** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de ramos sem idade

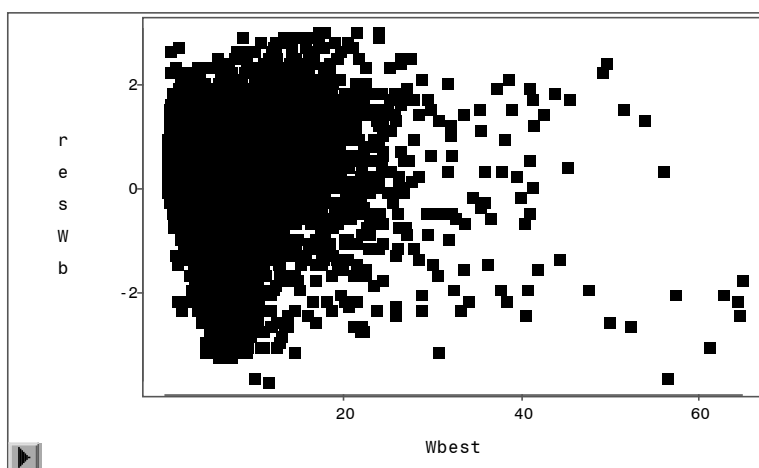


**Figura 40** – Gráfico em papel de probabilidades normal para os resíduos *studentizados* do modelo da biomassa de folhas sem idade

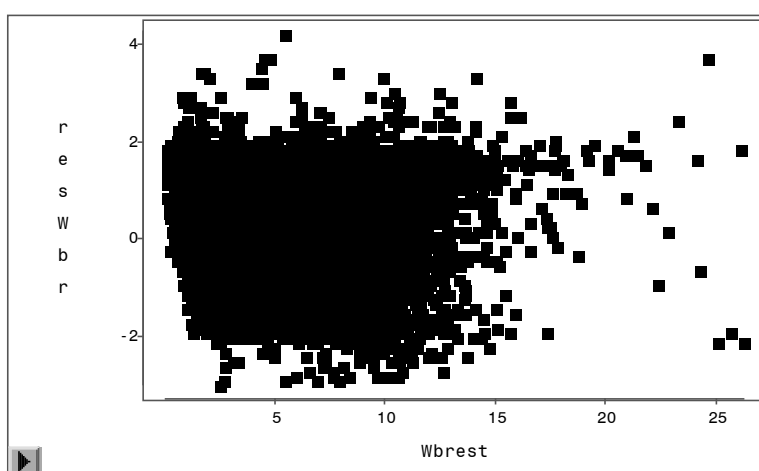
**ANEXO 8 : Gráficos dos resíduos *studentizados* em função dos valores preditos das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade após ajustamento simultâneo**



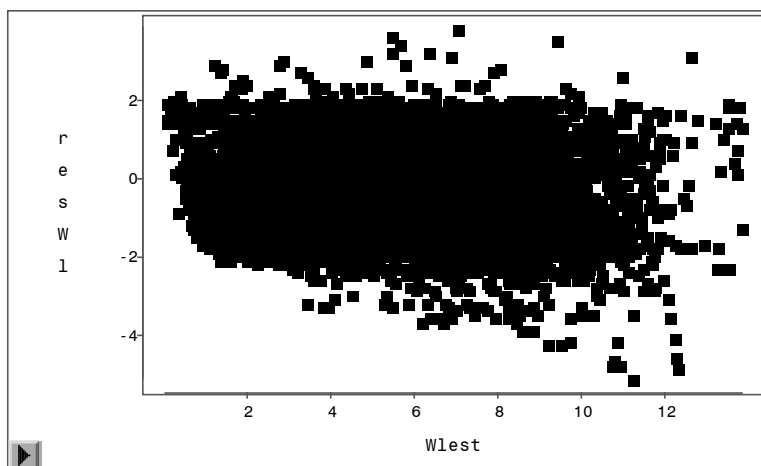
**Figura 41** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de lenho com idade



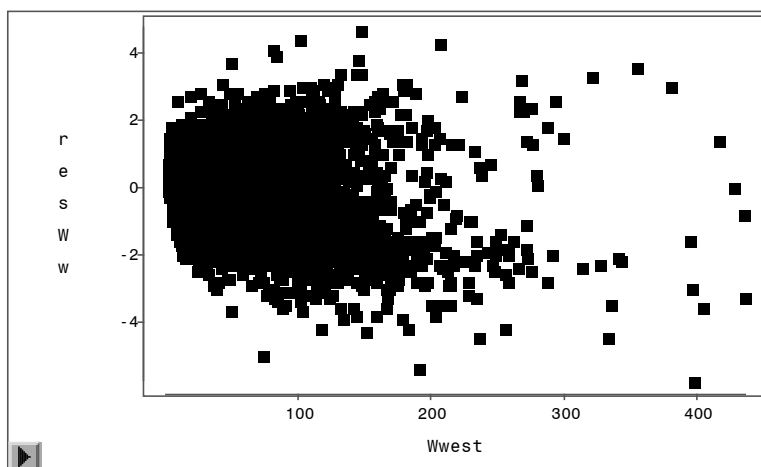
**Figura 42** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de casca com idade



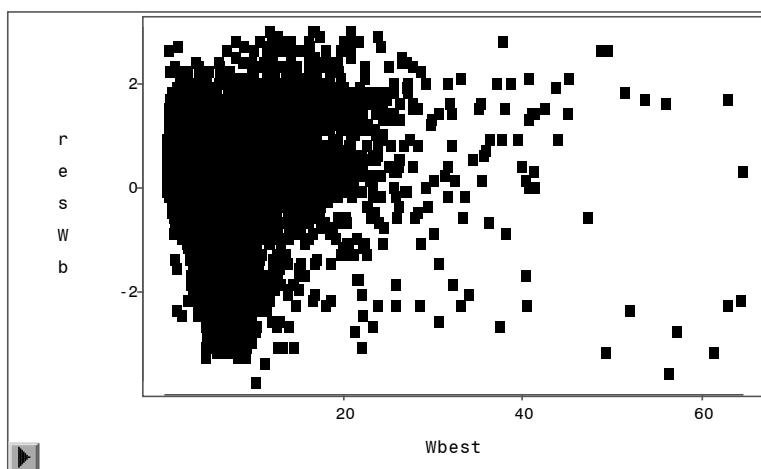
**Figura 43** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de ramos com idade



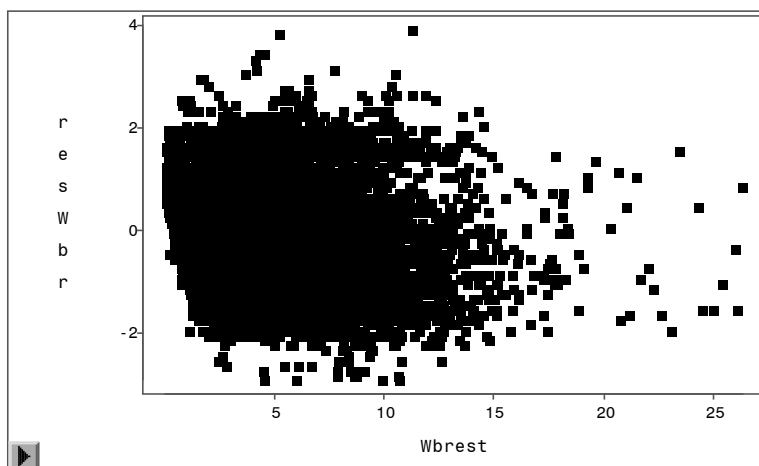
**Figura 44** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de folhas com idade



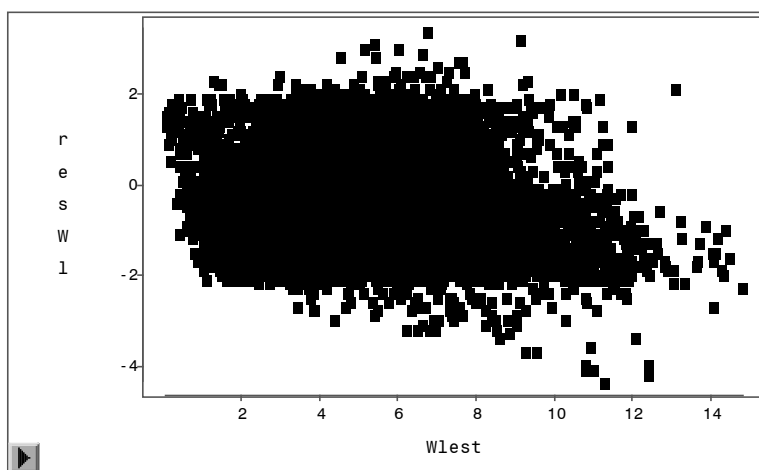
**Figura 45** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de lenho sem idade



**Figura 46** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de casca sem idade

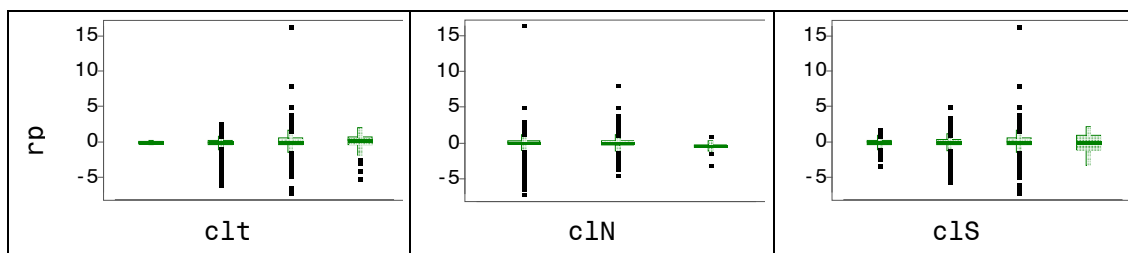


**Figura 47** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de ramos sem idade

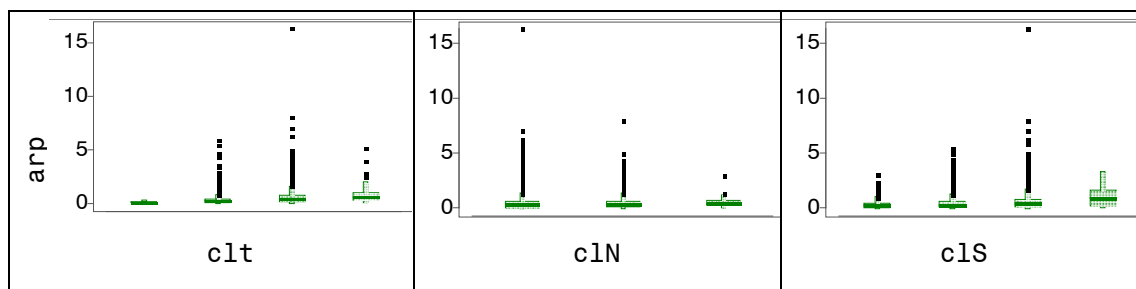


**Figura 48** – Relação gráfica entre os resíduos *studentizados* e as estimativas do modelo da biomassa de folhas sem idade

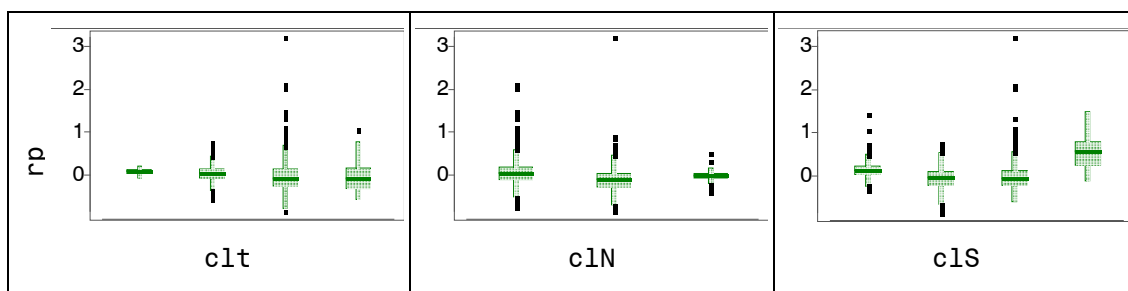
**ANEXO 9 : Gráficos de extremos e quartis (*box-plot*) dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S das diferentes componentes de biomassa dos sistemas de equações com e sem idade**



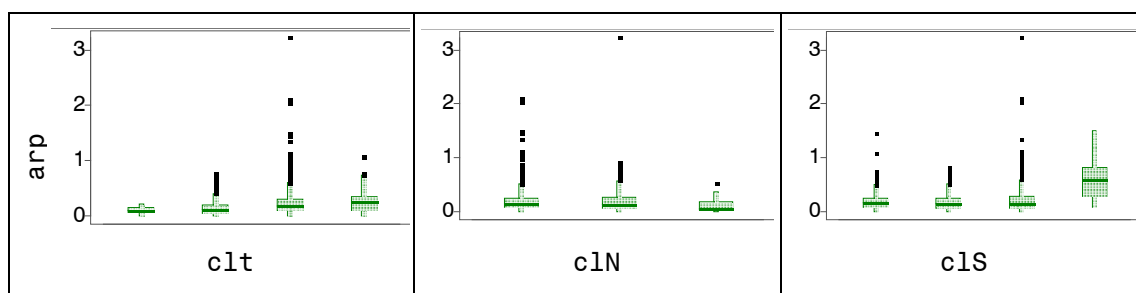
**Figura 49** – Gráficos de extremos e quartis (*box-plot*) dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de lenho com idade



**Figura 50** – Gráficos *box-plot* dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de lenho com idade

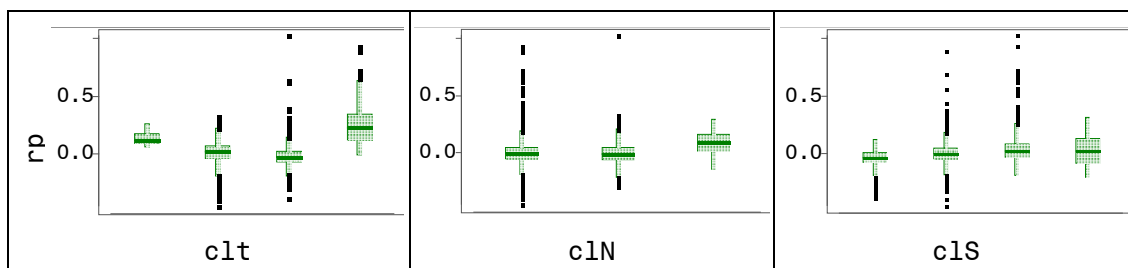


**Figura 51** – Gráficos *box-plot* dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de casca com idade

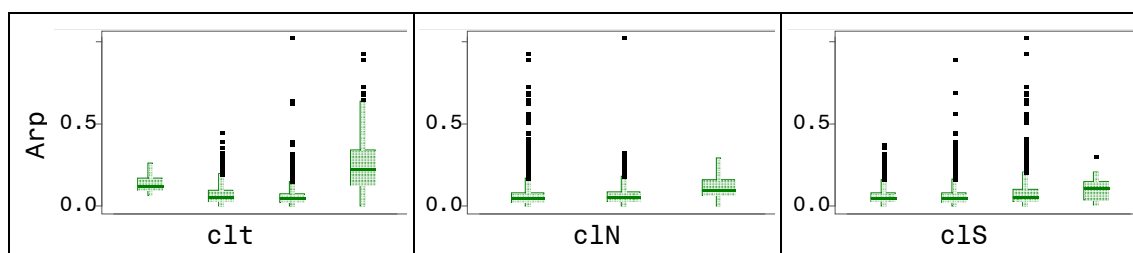


**Figura 52** – Gráficos *box-plot* dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de casca com idade

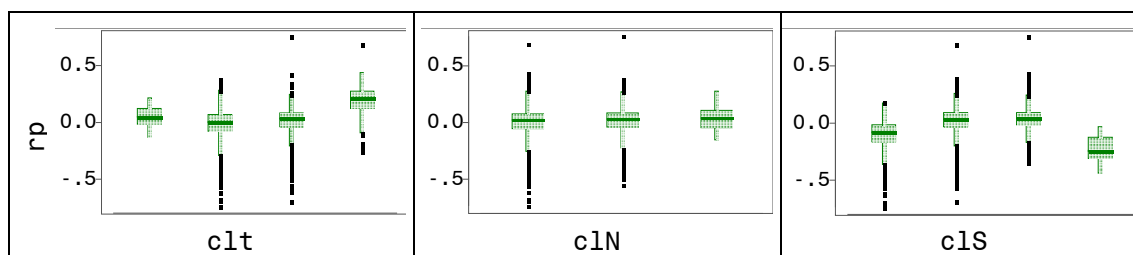




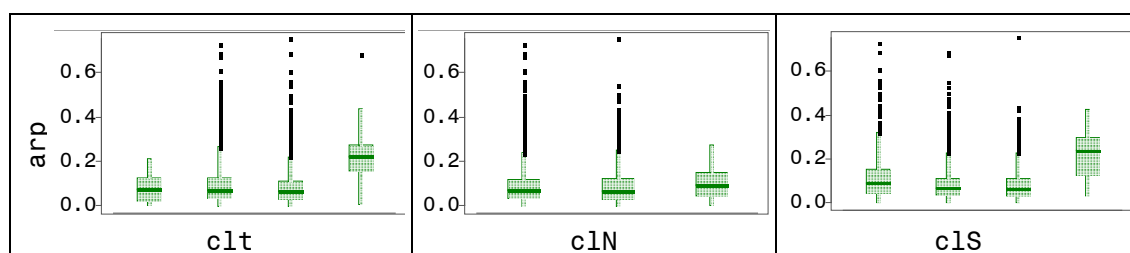
**Figura 53** – Gráficos *box-plot* dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de ramos com idade



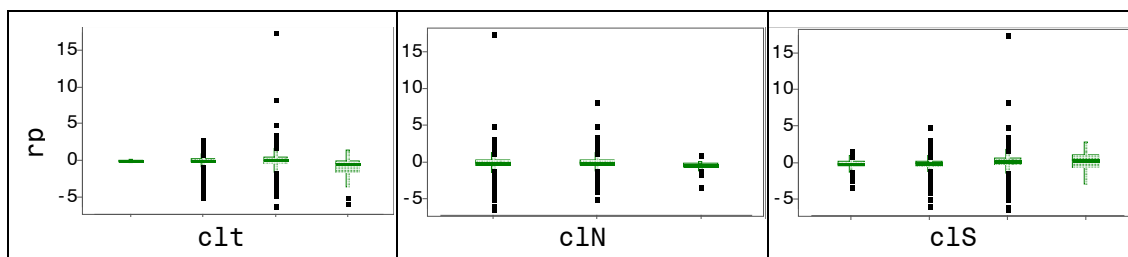
**Figura 54** – Gráficos *box-plot* dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de ramos com idade



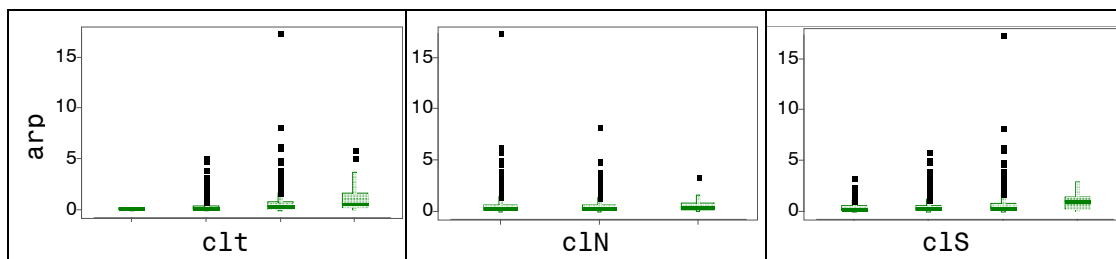
**Figura 55** – Gráficos *box-plot* dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de folhas com idade



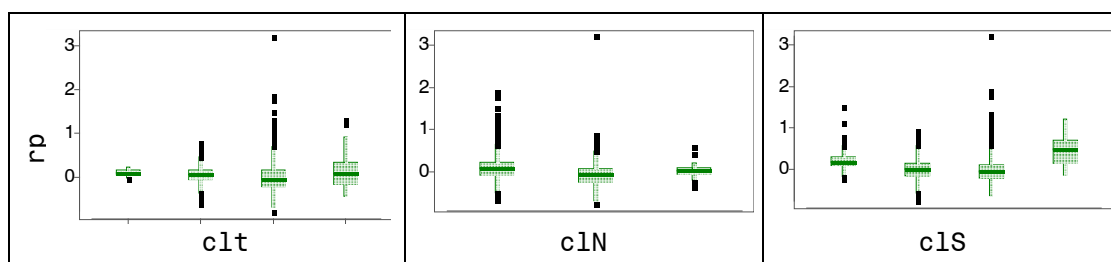
**Figura 56** – Gráficos *box-plot* dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de folhas com idade



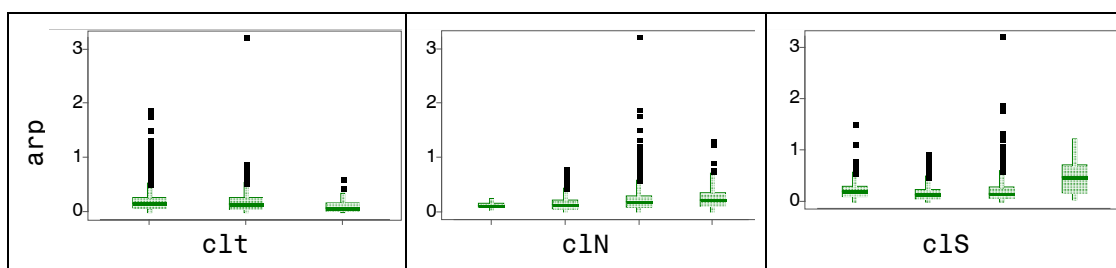
**Figura 57** – Gráficos *box-plot* dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de lenho sem idade



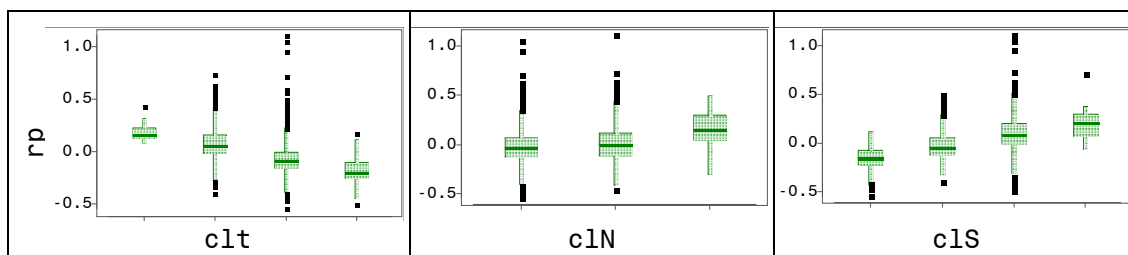
**Figura 58** – Gráficos *box-plot* dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de lenho sem idade



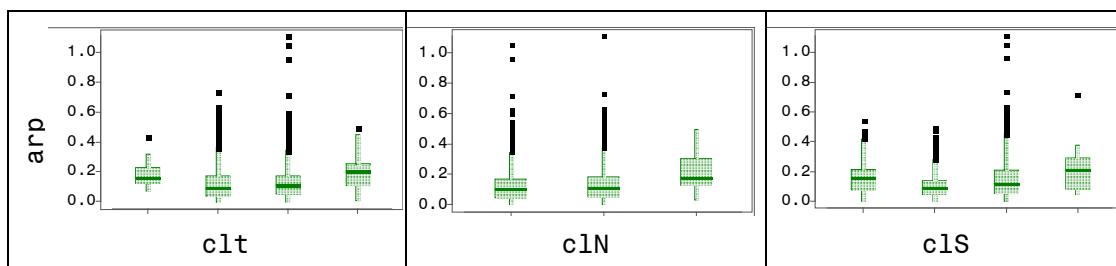
**Figura 59** – Gráficos *box-plot* dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de casca sem idade



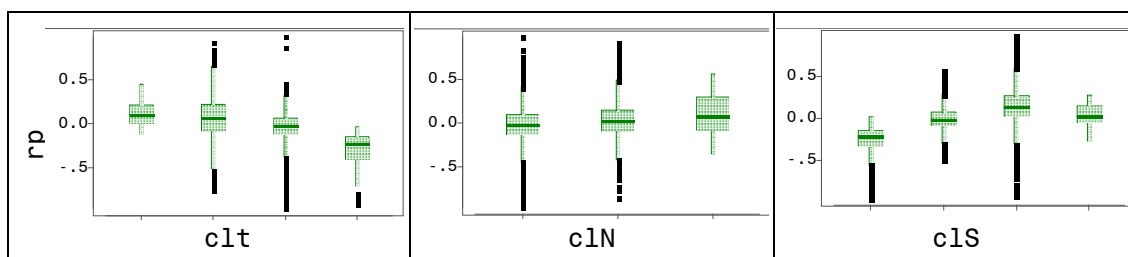
**Figura 60** – Gráficos *box-plot* dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de casca sem idade



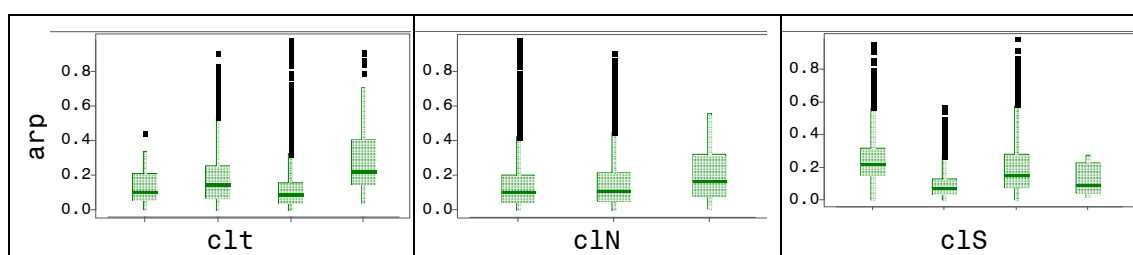
**Figura 61** – Gráficos *box-plot* dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de ramos sem idade



**Figura 62** – Gráficos *box-plot* dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de ramos sem idade



**Figura 63** – Gráficos *box-plot* dos resíduos de predição em função das classes de idade, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de folhas sem idade



**Figura 64** – Gráficos *box-plot* dos valores absolutos dos resíduos de predição em função das classes de t, N e S, respectivamente, para o modelo da biomassa de folhas sem idade